



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ  
ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

-

**COMPUTATIONAL STUDY AND ASSESSMENT OF PCM INCORPORATION IN  
THE WALLING SYSTEM OF A PILOT RESIDENTIAL HOUSE IN GREECE**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΟΠΑΟΥΚΑ ΠΑΥΛΟΥ**

Επίβλεψη: **Μ. Φούντη**, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

**Αθήνα**, Οκτώβριος 2019







## Ευχαριστίες

Με αφορμή την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους, που συνέβαλαν ο καθένας με τον δικό του τρόπο, στην ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κυρία Μαρία Φούντη για την ανάθεση της εργασίας και τον κύριο Δημήτριο Κατσουρίνη, μέλος του εργαστηριακού διδακτικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων & Συστημάτων καύσης, για την πολύτιμη καθοδήγησή καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον κύριο Γιάννη Ατσόνιο, μεταδιδάκτορα του εργαστηρίου, ο οποίος παρείχε τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα για την υλοποίηση των υπολογιστικών μοντέλων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους τους φίλους, τους συμφοιτητές και τους συγγενείς μου, και ιδιαίτερα τους γονείς μου, Μπένεκ και Βιβή, για την αμέριστη συμπαράστασή τους και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.



## Περίληψη

Η έννοια της Ενέργειας είναι συνυφασμένη με την ύπαρξη και τη δραστηριότητα του ανθρώπου. Το πρόβλημα που προκύπτει όμως από την μείωση των ορυκτών καυσίμων και τις επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον η παραγωγή ενέργειας, χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Ως προς αυτό, ελπιδοφόρα είναι η χρήση ειδικών υλικών στην τοιχοποιία, τα οποία όταν ενταχθούν στο κτιριακό κέλυφος αυξάνουν τη θερμοχωρητικότητά του και έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τα θερμικά και ψυκτικά φορτία των κτιρίων και συνεπώς τις ενεργειακές απαιτήσεις. Αυτά τα υλικά ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης – ΥΑΦ (Phase Change Materials – PCM) και η λειτουργία τους, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, βασίζεται στα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την μεταβολή της φυσικής τους κατάστασης και έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Παράγονται και χρησιμοποιούνται με ποικίλους τρόπους, έχουν πολυάριθμες εφαρμογές και η μελέτη-χρήση τους αποφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης που επιφέρει η χρήση τέτοιων υλικών, ως μέρος τοιχοποιίας που έχει κατασκευαστεί και μελετηθεί για πιλοτική κατοικία στην Ελλάδα. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης της τοιχοποιίας στο υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol® και πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές μελέτες ως προς την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών, του τύπου του χρησιμοποιούμενου ΥΑΦ, τον προσανατολισμό του τοιχώματος, το όριο θερμικής άνεσης που επιλέγεται και την θέση του ΥΑΦ εντός της τοιχοποιίας.

Από τη σύγκριση αποτελεσμάτων από μοντέλα στα οποία δε γίνεται χρήση ΥΑΦ με αντίστοιχα αποτελέσματα από μοντέλα με ΥΑΦ, προέκυψε ότι γενικά η χρήση ΥΑΦ επιφέρει μείωση των φορτίων της τοιχοποιίας και η επίδραση του ΥΑΦ εξαρτάται από τις συνθήκες που ορίζονται. Το βασικό ΥΑΦ που μελετήθηκε, φαίνεται να έχει μεγαλύτερη επίδραση για υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες και επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Η χρήση διαφορετικού υλικού επιφέρει αλλαγές στα αποτελέσματα, ενώ όταν αυτό τοποθετείται σε κάποιο αρχικό στρώμα της τοιχοποιίας, δρα αρκετά λιγότερο σε σχέση με όταν αυτό τοποθετηθεί στο τελευταίο στρώμα της.

**Λέξεις κλειδιά:** Υλικά Αλλαγής Φάσης, Αποθήκευση Λανθάνουσας Θερμότητας, Φορτία Τοιχοποιίας

## Abstract

The concept of Energy is intertwined with human existence and activity. However, the problem arising from the depletion of fossil fuels and the impact energy production has on the environment, needs to be addressed immediately. In this respect, it is hoped that the integration of special masonry materials in the walling systems in order to increase their thermal capacity, is able to reduce the thermal and cooling loads of buildings, and thus energy requirements. These materials are called Phase Change Materials (PCM) and their function, as their name implies, is based on the physical phenomena that occur during the change of their physical state and have the potential to function as means of latent heat storage. They are produced and used in a variety of ways, have numerous applications, and their study-use yields encouraging results.

The purpose of the present study is to examine the impact of the usage of such materials as part of the walling system of a pilot residential house in Greece. A computational model of the walling system was developed in the Comsol® software and parametric studies were carried out in order to examine the effect of meteorological conditions, the type of PCM used, the wall orientation, the selected thermal comfort limit and the location of the PCM within the wall.

Comparison of results from models that do not use PCM with corresponding results from models with such materials, shows that generally the use of PCM results in a reduction in walling loads and the effect of the PCM depends on the conditions specified. The basic PCM studied was found to have a greater effect on higher outdoor temperatures and solar radiation levels. The use of different material has an effect on the results, and when the material is applied to an initial layer of the walling system, is operating much less than when applied to the last layer.

**Keywords:** *Phase Change Materials, Latent Heat Storage, Walling System Loads*



## Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	13
Πρόλογος.....	13
Αντικείμενο Διπλωματικής.....	13
Οργάνωση Κειμένου .....	14
Θεωρητικό Μέρος .....	15
1 Ενέργεια .....	15
1.1 Η Ενέργεια .....	15
1.2 Ενέργεια και Άνθρωπος.....	15
1.3 Πηγές Ενέργειας .....	17
1.3.1 Παραγωγή Ενέργειας από Ορυκτά Καύσιμα.....	17
1.3.2 Παραγωγή Ενέργειας από Πυρηνικά Καύσιμα .....	18
1.3.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	19
1.4 Ενεργειακό Πρόβλημα .....	20
1.5 Αποθήκευση Ενέργειας .....	22
2 Υλικά Αλλαγής Φάσης .....	24
2.1 Η Ύλη και οι Καταστάσεις της.....	24
2.2 Αλλαγή Φάσης.....	25
2.3 Λανθάνουσα Θερμότητα Αλλαγής Φάσης.....	26
2.4 ΥΑΦ – Ορισμός και Ιδιότητες .....	27
3 Κατηγορίες ΥΑΦ .....	30
3.1 Οργανικά ΥΑΦ .....	30
3.1.1 Παραφίνες .....	30
3.1.2 Μη Παραφινούχα Υλικά .....	32
3.2 Ανόργανα ΥΑΦ .....	33
3.2.1 Ένυδρα Άλατα.....	33
3.2.2 Μεταλλικά ΥΑΦ .....	35
3.3 Εύτηκτα Μείγματα .....	35
4 Τρόποι Ένταξης ΥΑΦ σε Εφαρμογές - Εφαρμογές ΥΑΦ .....	37
4.1 Γενικά.....	37
4.2 Ενσωμάτωση ΥΑΦ στα Δομικά Υλικά.....	37
4.2.1 Άμεση Ενσωμάτωση – Direct Incorporation .....	37
4.2.2 Απορρόφηση – Immersion .....	37

4.2.3 Ενθυλάκωση – Encapsulation.....	38
4.2.4 Πολυστρωματική Σανίδα ΥΑΦ – Laminated PCM Board.....	40
4.3 Κτιριακές Εφαρμογές .....	40
4.3.1 Τοιχοποιία .....	40
4.3.2 Ηλιακοί Τοίχοι .....	41
4.3.3 Παράθυρα .....	42
4.3.4 Δάπεδα .....	43
4.3.5 Οροφές .....	44
4.3.6 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα και νερού .....	44
4.4 Άλλες Εφαρμογές .....	45
4.4.1 Ηλιακά Μαγειρικά Σκεύη .....	45
4.4.2 Ηλιακά Θερμοκήπια .....	45
4.4.3 Ιατρική .....	45
4.4.4 Λοιπές Εφαρμογές.....	46
5 ΥΑΦ στην Τοιχοποιία – Μελέτες και αποτελέσματα .....	47
5.1 Γενικά.....	47
5.2 Μελέτες στην Τοιχοποιία .....	48
Υπολογιστικό Μέρος .....	50
6 Παρουσίαση Λογισμικού Comsol Multiphysics® .....	50
7 Παρουσίαση Τοιχοποιίας – Πιλοτική Κατοικία Αμφιλοχίας .....	51
8 Παρουσίαση Υπολ. Μοντέλου Πιστοποίησης – Σύγκριση με Πειραματικά Δεδομένα .....	53
8.1 Παρουσίαση Υπολογιστικού Μοντέλου Πιστοποίησης (1-d) .....	53
8.1.1 Η Γεωμετρία του Μοντέλου .....	53
8.1.2 Φυσικές και Θερμικές Ιδιότητες Υλικών .....	54
8.1.3 Αρχικές Συνθήκες .....	56
8.1.4 Εξωτερική Οριακή Συνθήκη – Θερμοκρασία Εξωτερικού Τοιχώματος.....	57
8.1.5 Εσωτερική Οριακή Συνθήκη – Ροή Θερμότητας Εσωτερικού Τοιχώματος.....	59
8.1.6 Υπολογιστικό Πλέγμα .....	61
8.1.7 Υπολογιστικός Χρόνος – Επιλύτης.....	62
8.1.8 Η Θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ .....	63
8.2 Σύγκριση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων με Πειραματικά Δεδομένα .....	65
9 Παρουσίαση Υπολ. Μοντέλου Τοιχοποιίας για την Περίοδο Ψυκτικών Φορτίων .....	67
9.1 Η Γεωμετρία του Μοντέλου .....	67

9.2 Φυσικές και Θερμικές Ιδιότητες Υλικών .....	68
9.3 Αρχική Συνθήκη .....	69
9.4 Εξωτερική Οριακή Συνθήκη – Εξωτερική Ροή Θερμότητας .....	70
9.5 Εσωτερική Οριακή Συνθήκη – Εσωτερική Ροή Θερμότητας .....	73
9.6 Υπολογιστικό Πλέγμα .....	75
9.7 Υπολογιστικός Χρόνος – Επιλύτης.....	75
9.8 Η Θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ .....	77
9.9 Εξαγωγή και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων Μοντέλου Προσομοίωσης .....	79
10 Παρουσίαση Παραμετρικών Μελετών – Αποτελεσμάτων .....	83
10.1 Επίδραση Κλιματικής Ζώνης .....	83
10.2 Επίδραση Τύπου ΥΑΦ .....	87
10.3 Επίδραση Προσανατολισμού Τοιχώματος.....	94
10.4 Επίδραση Ορίου Θερμικής Άνεσης .....	99
10.5 Επίδραση Θέσης Γυψοσανίδας ΥΑΦ.....	103
11 Ετήσιες Υπολογιστικές Προσομοιώσεις .....	107
12 Συμπεράσματα – Σχόλια – Προτάσεις για Μελλοντικές Έρευνες .....	110
10 Βιβλιογραφία.....	112



# Εισαγωγή

## Πρόλογος

Στο βιβλίο του Alfred W. Cosby με τίτλο “Children of the Sun”, υπάρχει ο ορισμός ότι [...ο σύγχρονος πολιτισμός είναι το προϊόν μιας ενεργειακής αποκάλυψης, αλλά η αχόρταγη όρεξη της ανθρωπότητας για ενέργεια κάνει τις λύσεις εφήμερες και την πρόκληση μόνιμη...] [1]. Με την εντατικοποίηση ορισμένων δυσμενών συνθηκών τα τελευταία έτη, όπως η μόλυνση του περιβάλλοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη μεθόδων για αποδοτικότερη παραγωγή και διαχείριση της ενέργειας έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί άμεσα το ενεργειακό πρόβλημα. Ως προς αυτό υφίστανται δύο σημαντικοί κλάδοι. Ο πρώτος, αφορά την βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας και ο δεύτερος, αφορά την αποθήκευση και γενικότερα την αποδοτικότερη χρήση της παραγόμενης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου και της μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων σε υπάρχοντα συστήματα.

## Αντικείμενο Διπλωματικής

Σε αυτό το δεύτερο σκέλος επικεντρώνεται και η παρούσα εργασία, καθώς μελετάται η χρήση συγκεκριμένων υλικών στην τοιχοποιία, η οποία μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων. Αυτά τα υλικά ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης – ΥΑΦ (Phase Change Materials – PCM) και η λειτουργία τους, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, βασίζεται στα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την μεταβολή της φυσικής τους κατάστασης και τα οποία αναλύονται στο θεωρητικό μέρος της εργασίας.

Σκοπός του υπολογιστικού μέρους της εργασίας είναι η μελέτη των ΥΑΦ σε δομικό επίπεδο, ως μέρος τοιχοποιίας πιλοτικής κατοικίας στην Ελλάδα και της επίδρασης που μπορεί να επιφέρει η χρήση τους σε εν δυνάμει φορτία από την τοιχοποιία που μελετάται. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο στο υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol Multiphysics®, το οποίο πιστοποιήθηκε μέσω σύγκρισης υπολογιστικών αποτελεσμάτων με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, και το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ποικίλων παραμετρικών μελετών.

Στις παραμετρικές αυτές μελέτες, ζητούμενο είναι η αξιολόγηση των εν δυνάμει φορτίων και της τυχόν μείωσής τους λόγω χρήσης ΥΑΦ στην τοιχοποιία. Έτσι, επιλέχθηκε να μελετηθεί η επίδραση των ΥΑΦ στα εν δυνάμει φορτία τοιχοποιίας και μεταβολής αυτής της επίδρασης σε σχέση με την κλιματική ζώνη στην οποία εντάσσεται το μοντέλο, τον τύπο του χρησιμοποιούμενου ΥΑΦ, τον προσανατολισμό του τοιχώματος, το επίπεδο της θερμικής άνεσης του εσωτερικού αέρα της κατοικίας και της θέσης του ΥΑΦ εντός της τοιχοποιίας.

### Οργάνωση Κειμένου

Στο πρώτο, θεωρητικό, μέρος της εργασίας επιχειρείται η συνοπτική παράθεση όλης της θεωρίας που αφορά το αντικείμενο μελέτης της. Έτσι, στο Κεφάλαιο 1 ορίζεται η έννοια της Ενέργειας και των εννοιών που βασίζονται σε αυτή και αφορούν την παρούσα εργασία, το Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο για τα Υλικά Αλλαγής Φάσης και το Κεφάλαιο 3 τις κατηγορίες στις οποίες αυτά κατανέμονται. Στα Κεφάλαια 4 και 5 γίνεται συνοπτική παρουσίαση των εφαρμογών των ΥΑΦ και μελετών πάνω σε αυτά.

Στο δεύτερο, υπολογιστικό, μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η υπολογιστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας. Στα Κεφάλαια 6 και 7 υπάρχουν πληροφορίες για το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και την τοιχοποιία με ΥΑΦ η οποία μελετήθηκε, στο Κεφάλαιο 8 γίνεται η παρουσίαση και η πιστοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου, ενώ στο Κεφάλαιο 9 γίνεται η παρουσίαση του μοντέλου των παραμετρικών μελετών. Στα Κεφάλαια 10 και 11 παρουσιάζονται οι παραμετρικές μελέτες και τα αποτελέσματά τους.

# Θεωρητικό Μέρος

## 1

### Ενέργεια

#### 1.1 Η Ενέργεια

Η ενέργεια αποτελεί το φυσικό και μετρήσιμο μέγεθος που πρέπει να προσδοθεί στην ύλη ώστε να μεταβληθεί η κατάστασή της είτε με τη μορφή έργου, είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας της. Σύμφωνα με το νόμο της διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια δεν μπορεί να καταστραφεί ή να δημιουργηθεί από το μηδέν. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται, να μεταφέρεται και να μετατρέπεται από μία της μορφή σε μία άλλη.

Βασική μορφή ενέργειας είναι η Μηχανική Ενέργεια, η οποία διαχωρίζεται σε Δυναμική και Κινητική, οι οποίες περιγράφουν την ενέργεια που κατέχει ένα σώμα λόγω της θέσης ή της κίνησης του στον χώρο αντιστοίχως. Άλλες βασικές μορφές είναι η Ηλεκτρική, η Θερμική, η Πυρηνική-Ατομική, η Χημική και η Ηλεκτρομαγνητική, οι οποίες έχουν να κάνουν με τα δομικά στοιχεία της ύλης.

Στο Διεθνές Σύστημα Μετρικών Μονάδων (S.I.), μονάδα μέτρησης της ενέργειας είναι το 1 Joule και είναι το έργο που παράγεται όταν δύναμη 1 Newton κινεί ένα αντικείμενο σε απόσταση 1 μέτρου. [2]

#### 1.2 Ενέργεια και Άνθρωπος

Η έννοια της ενέργειας είναι συνυφασμένη με την επιβίωση του ανθρώπου. Όπως όλοι οι οργανισμοί, έτσι και ο ανθρώπινος απαιτεί ορισμένα ποσά ενέργειας για τη λειτουργία του. Ο άνθρωπος προσλαμβάνει αυτήν την ενέργεια μέσω της χημικής ενέργειας της τροφής του, η οποία με τη σειρά της ανάγεται σε ενέργεια που προέρχεται από τον Ήλιο, δηλαδή ηλιακή ενέργεια. Για το μεγαλύτερο μέρος της ιστορίας του ανθρώπινου είδους, μοναδική πηγή ενέργειας ήταν αυτή που παρήγαγε ο ίδιος και οι μύες του ή οι μύες εξημερωμένων ζώων. Με την ανακάλυψη της φωτιάς, πλέον είχε πρόσβαση σε παραγωγή θερμότητας με τη χρήση καύσιμων υλικών, καλύτερη ποιότητα φαγητού και συνεπώς καλύτερη απόδοση της τροφής του, ενώ πλέον μπορούσε να λιώσει και να χρησιμοποιήσει μέταλλα για να φτιάξει καλύτερα εργαλεία. Μετά από αυτό και για πολύ μεγάλο διάστημα, μοναδική άλλη πηγή ενέργειας αποτελούσαν οι υδρόμυλοι και οι ανεμόμυλοι. Η επόμενη μεγάλη αλλαγή ήρθε με την βιομηχανοποίηση, καθώς πλέον

ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ενέργειας, όπως το κάρβουνο στις ατμομηχανές. Ως επακόλουθο ήρθε και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το πετρέλαιο διαδέχθηκε το κάρβουνο ως βασικό ορυκτό καύσιμο, κάτι το οποίο όχι μόνο βελτίωσε την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά προκάλεσε και την επανάσταση στις μετακινήσεις. Επόμενο βήμα αποτέλεσε η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας και τέλος, λόγω του προβληματισμού για την πορεία του περιβάλλοντος, αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [1] [3]



### 1.3 Πηγές Ενέργειας

Η παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της ανθρωπότητας γίνεται με δεδομένα μέσα και αυτή μπορεί να φτάσει ένα πεπερασμένο ποσό, καθώς ο πλανήτης στον οποίο κατοικούμε έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και πεπερασμένες ποσότητες υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά ως καύσιμα.

Ανάλογα με την προέλευσή της η παραγωγή ενέργειας χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες, την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, από πυρηνικά καύσιμα ή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

#### 1.3.1 Παραγωγή Ενέργειας από Ορυκτά Καύσιμα

Όπως δηλώνει και η ονομασία τους, τα ορυκτά καύσιμα είναι υλικά που βρίσκονται στο υπέδαφος της Γης και εξορύσσονται για να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμη ύλη σε διαδικασίες που απαιτούν την παραγωγή υψηλών ποσών θερμότητας. Η παραγόμενη θερμότητα, με τη σειρά της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεννητριών, για την παραγωγή κινητικής ενέργειας μέσω Μηχανών Εσωτερικής Καύσης ή για ποικίλες άλλες εφαρμογές.

Κύρια ορυκτά καύσιμα παγκοσμίως θεωρούνται τα παρακάτω, καθώς διαθέτουν υψηλή θερμογόνο ικανότητα λόγω της φύσης τους και προτιμώνται έναντι άλλων με χαμηλότερη θερμογόνο ικανότητα, καθώς προφανώς είναι αποδοτικότερα όταν χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη.

Καύσιμο	Ενεργειακή πυκνότητα / θερμογόνος ικανότητα
Πετρέλαιο	45 MJ/kg
Κάρβουνο	24 MJ/kg
Φυσικό αέριο	34-28 MJ/m <sup>3</sup>

*Πίνακας 1.3.1 Ορυκτά καύσιμα και η ενεργειακή τους πυκνότητα*

Η προέλευση τους, σύμφωνα με τους περισσότερους γεωλόγους, οφείλεται στον εγκλωβισμό τεράστιων ποσών οργανικής ύλης που προέρχεται από προϊστορικούς οργανισμούς σε κοιλότητες της Γης. Σε αυτές τις κοιλότητες, αφού εφαρμόστηκαν μεγάλες πιέσεις και αυξήσεις θερμοκρασίας λόγω των γεωλογικών μεταβολών του φλοιού της Γης, η οργανική ύλη μετατράπηκε στα παραπάνω υλικά κατά το πέρασμα μεγάλων χρονολογικών περιόδων. [4]

Σε αυτό το σημείο κρίνεται χρήσιμο να γίνει αναφορά και στον λιγνίτη, το «εθνικό μας ορυκτό καύσιμο», καθώς η χώρα μας κατέχει τη δεύτερη θέση σε παραγωγή λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την έκτη παγκοσμίως. Ο λιγνίτης θεωρείται κατώτατης ποιότητας γαιάνθρακας, διότι η ενεργειακή του πυκνότητα κυμαίνεται από 10 έως 20 MJ/kg και λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του σε υγρασία και εύφλεκτα υλικά, που

δυσχεραίνουν τη χρήση τους. Παρόλα αυτά, λόγω των μεγάλων κοιτασμάτων λιγνίτη στο υπέδαφος της Ελλάδας (εκτιμώμενο εναπομείναν απόθεμα  $10 \times 10^9$  τόνοι [5]), αποτελεί βασικό πυλώνα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΔΕΗ, αφού χρησιμοποιείται σε μεγάλους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, όπως αυτός της Πτολεμαΐδας. [2] [6]



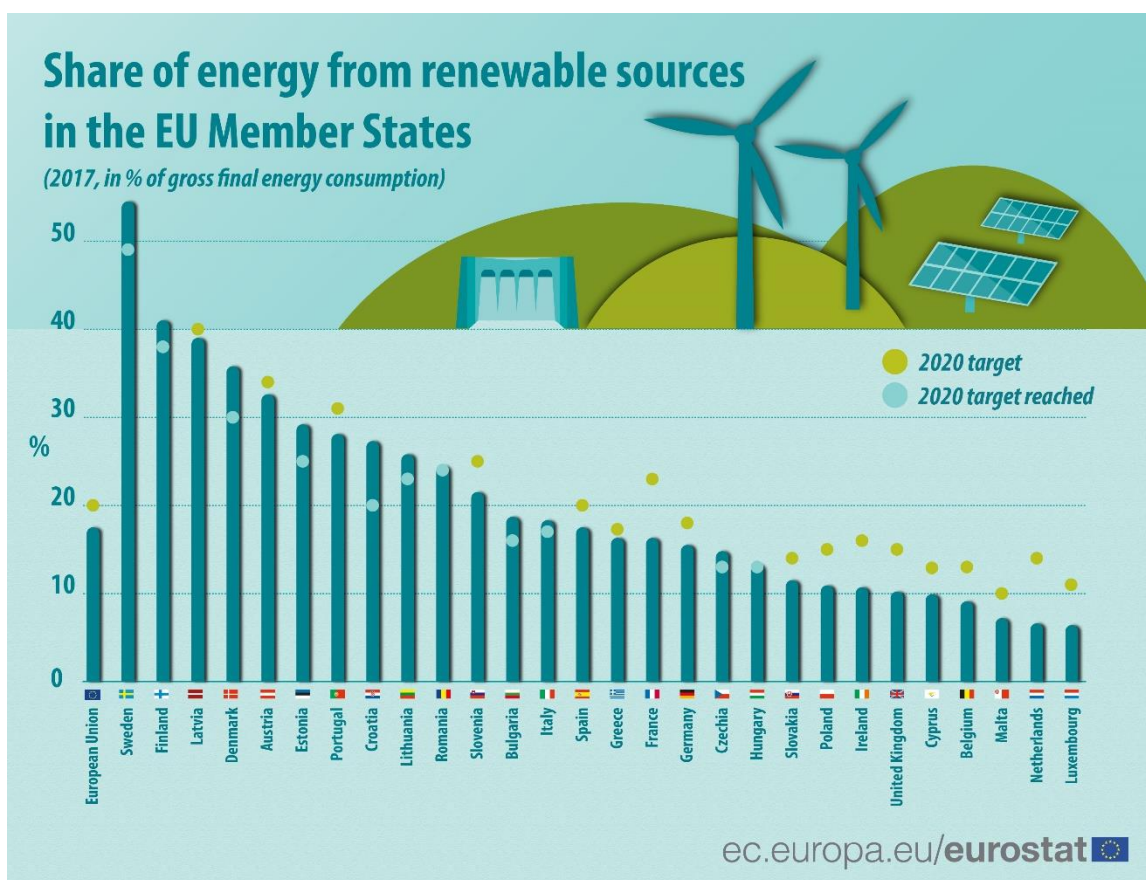
*Εικόνα 1.3.1 Μεταφορά λιγνίτη από το πρώτο λιγνιτωρυχείο της ΔΕΗ στο Αλιβέρι, Ιούνιος 1953 , από το οπτικό αρχείο της ΔΕΗ [7]*

### 1.3.2 Παραγωγή Ενέργειας από Πυρηνικά Καύσιμα

Στα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας πραγματοποιούνται ελεγχόμενες σχάσεις βαρέων ατομικών πυρήνων, μια διαδικασία που εκλύει τεράστια ποσά θερμότητας που χρησιμοποιούνται από παραπλήσιους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Το πλέον διαδεδομένο πυρηνικό καύσιμο είναι το βαρύ μέταλλο Ουράνιο και ενδεικτικά αναφέρεται ότι μία μικρή ποσότητα Ουρανίου, της τάξης μεγέθους ενός πέλετ, διαθέτει ενέργεια ισοδύναμη ενός τόνου κάρβουνου ή δυόμιση τόνων ξύλου ή  $17,000 \text{ m}^3$  φυσικού αερίου. [4]

### 1.3.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Καθώς τα περιβαλλοντικά προβλήματα εντείνονται λόγω της δραστηριότητας του ανθρώπου, αναζητούνται άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας από τις δύο παραπάνω, που θεωρούνται μη αναστρέψιμες και που κατά περίπτωση είναι ιδιαίτερα επιβαρυντικές ή επιμολυντικές για το περιβάλλον. Τέτοιες είναι οι ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες είναι ουσιαστικά μέρος των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον πλανήτη και που αναπληρώνονται διαρκώς εντός του οικοσυστήματός του. Επιγραμματικά, οι κυριότερες είναι η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική, και η ενέργεια από βιομάζα ή από θαλάσσια κύματα. Τα τελευταία χρόνια γίνεται σημαντική προσπάθεια όλες οι παραπάνω να ενταχθούν στα συστήματα παραγωγής ενέργειας και να αντικαταστήσουν ή και να εξαλείψουν τις μη ανανεώσιμες πηγές.



Εικόνα 1.3.3 Ποσοστό ένταξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο εθνικό δίκτυο των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2017, Eurostat [8]

## 1.4 Ενεργειακό Πρόβλημα

Η ποιότητα ζωής του ανθρώπου είναι άρρηκτα συνυφασμένη με την πρόσβαση που μπορεί να διαθέτει σε αξιοποιήσιμες και οικονομικές πηγές ενέργειας. Η ολοένα αυξανόμενη ένταξη ενεργοβόρων συσκευών και μηχανών στη ζωή του, που ως σκοπό έχουν να βελτιώσουν το βιοτικό του επίπεδο, συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση σε ενεργειακές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, μια από τις πλέον αναπτυγμένες χώρες, οι ενεργειακές δαπάνες σε σχέση με το 1950 έχουν σχεδόν τριπλασιαστεί.

Γενικά, η παραγωγή ενέργειας έχει ακολουθήσει αντίστοιχη πορεία για να καλύψει αυτές τις ανάγκες. Η ανθρωπότητα συνειδητοποίησε ότι με την κρατούσα κατάσταση και την μεγάλη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα ώστε να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, οδεύει προς ένα αδιέξοδο. Ο ορυκτός πλούτος του πλανήτη δεν είναι ανεξάντλητος και πολλές φορές γίνεται αντικείμενο έριδος και πολιτικών σκοπιμοτήτων, που προκαλούν αστάθειες.

Αυτό πολλοί θεωρούν ότι έγινε ευρέως αντιληπτό με την ενεργειακή κρίση του 1973. Λόγω προστριβών των κυβερνήσεων των ΗΠΑ και των Αραβικών Εμιράτων για την περιοχή της Μέσης Ανατολής, οι Άραβες μείωσαν δραματικά τις αντλήσεις αργού πετρελαίου και συνεπώς η διάθεσή του στους Αμερικάνους μειώθηκε κατακόρυφα. Σαν αποτέλεσμα, η τιμή του πετρελαίου στις ΗΠΑ τετραπλασιάστηκε, οι ελλείψεις στα πρατήρια καυσίμων και στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας ήταν συχνό φαινόμενο και οι επικλήσεις για περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, από τους κατοίκους πολλών αναπτυγμένων χωρών του δυτικού κόσμου, συνεχείς. Μία ενδιαφέρουσα παράμετρος αυτού του προβλήματος ήταν ότι ενώ μέχρι τότε η αμερικάνικη αυτοκινητοβιομηχανία άκμαζε και προωθούσε στην αγορά όλο και μεγαλύτερα αυτοκίνητα, με τις ελλείψεις σε καύσιμα εκείνη την εποχή, πολλοί στράφηκαν στην γιαπωνέζικη αγορά, ώστε να προμηθευτούν τα σαφώς πιο μικρά και οικονομικά οχήματά της. [9]



*Εικόνα 1.4.α Πολίτες των ΗΠΑ στα τέλη του 1973 αντίκριζαν συχνά αυτή την εικόνα όταν πήγαιναν να γεμίσουν τα ρεζερβουάρ των αυτοκινήτων τους*

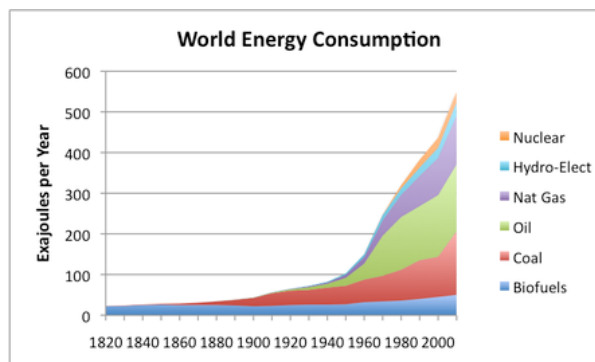


Το εμπόργκο του πετρελαίου μπορεί να έληξε μερικούς μήνες αργότερα, αλλά η τιμή του πετρελαίου επανήλθε στα προηγούμενα επίπεδά της τουλάχιστον μία δεκαετία μετά. Αυτό προκάλεσε μία σημαντική καθυστέρηση της ανάπτυξης και είχε μια σειρά από άλλες οικονομικές, πολιτικές και κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η αύξηση των εισαγωγών, η θέσπιση νόμων για την ανεξαρτητοποίηση από τα ορυκτά καύσιμα και την άνοδο του περιβαλλοντικού κινήματος.



Εικόνα 1.4.β Τα περιβαλλοντικά κινήματα είχαν ξεκινήσει τη δράση τους ήδη από την προηγούμενη δεκαετία, αλλά υπήρξε σαφώς μαζικότερη κινητοποίηση την δεκαετία του '70.  
New York Times, 22 Απριλίου 1970, Η πρώτη Earth Day

Σε παγκόσμιο επίπεδο το ενεργειακό επίπεδο είναι υπαρκτό και ιδιαίτερα απειλητικό για τον πολιτισμό όπως τον γνωρίζουμε σήμερα. Οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται με ρυθμό 3% ετησίως τα τελευταία χρόνια, ενώ ακόμη δεν έχουμε ανεξαρτητοποιηθεί από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας που επέτρεψαν την ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη του 20<sup>ου</sup> αιώνα. [10]



Εικόνα 1.4.γ Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας σε EJ ( $10^{18}$  J) και οι πηγές της [11] [12]

### 1.5 Αποθήκευση Ενέργειας

Ως έχουν, όλα τα ηλεκτρικά δίκτυα και γενικότερα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας είναι αναπόφευκτα δομημένα έτσι ώστε να αποδίδουν περισσότερη ενέργεια από αυτή που ζητείται. Αυτό γίνεται ώστε το σύστημα να είναι πάντα σε ετοιμότητα να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου και παράλληλα να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει άμεσα σε απότομες αυξήσεις, κυρίως κατά τις ώρες αιχμής. Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έχουν μικρότερη απόκριση σε απότομες διακυμάνσεις σε σχέση με τα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Οπότε, για να κρίνεται ένα δίκτυο σταθερό, θα πρέπει να βασίζεται κυρίως στα ορυκτά καύσιμα ή αν βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές, να διαθέτει μόνιμα πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από τα απαιτούμενα, κάτι στο οποίο υπεισέρχεται και το πρόβλημα ότι η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές δεν είναι πάντα εφικτή. Τα ηλιακά συστήματα για παράδειγμα απαιτούν ηλιοφάνεια και τα αιολικά ικανό αιολικό δυναμικό για να παράξουν ενέργεια. Η περισσευούμενη ενέργεια τελικά πρέπει να απορριφθεί στο περιβάλλον αφού δεν μπορεί να καταστραφεί, με σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Όπως έγινε ήδη αναφορά σε αυτό, το ενεργειακό πρόβλημα επιτάσσει την μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων, ενώ παράλληλα δεν πρέπει να μπου εμποδία στην ανάπτυξη και το βιοτικό επίπεδο της ανθρωπότητας. Συνεπώς, γίνεται προσπάθεια να ενταχθούν σε μεγαλύτερο ποσοστό συστήματα που δεν χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Αυτά μπορεί να βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ή σε εναλλακτικές μεθόδους. Σε κάθε περίπτωση όμως πρέπει συνολικά να παράγουν ικανά ποσά ενέργειας για να μπορέσουν να αποτελέσουν τη βάση του δικτύου διανομής.

Υπάρχει λοιπόν η τάση να ανακαλυφθούν ή να βελτιστοποιηθούν υπάρχουσες μέθοδοι για την αποθήκευση της περισσευούμενης ενέργειας, η οποία θα απορριπτόταν αλλιώς στο περιβάλλον. Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια θα μπορούσε να δώσει λύση στα σημαντικότερα προβλήματα της χρήσης εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, καθώς αφενός αυτή η ενέργεια θα μπορούσε να αποδοθεί εκ νέου στο δίκτυο όταν παρουσιαστεί κατακόρυφη αύξηση της ζήτησης, ενώ αφετέρου θα αποτελούσε μία πηγή ενέργειας αυτή καθαυτή όταν τα συστήματα αυτά δεν μπορούν να συνδράμουν λόγω της φύσης τους. Δεν αφορούν όλα την απόδοση ενέργειας σε κάποιο δίκτυο, αλλά κάποια μπορούν να είναι ανεξάρτητα από αυτό και να λειτουργούν επικουρικά ή να μειώνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις με την εφαρμογή τους. [13]

Αναλόγως με τις ιδιότητες και τα φυσικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, αυτά διαχωρίζονται συνοπτικά ως εξής:

- Μηχανικά, με κύριο εκπρόσωπο τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς άντλησης
- Ηλεκτρομαγνητικά, όπως είναι οι πυκνωτές
- Βιολογικά, με τη χρήση γλυκογόνων και πολυσακχαριτών
- Ηλεκτροχημικά, όπως είναι και οι κοινές μπαταρίες

- Χημικά, κυρίως χρησιμοποιώντας υδρογόνο
- Θερμικά, στα οποία εντάσσονται και τα Υλικά Αλλαγής Φάσης, για τα οποία θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση παρακάτω

# 2

## Υλικά Αλλαγής Φάσης

Κλείνοντας, στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι τα Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) ανήκουν στα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν, εφόσον αποτελούν και το αντικείμενο μελέτης του παρόντος, να γίνει αναλυτικότερη περιγραφή των χαρακτηριστικών τους και της θεωρίας γύρω από αυτά.

### 2.1 Η Ύλη και οι Καταστάσεις της

Μία ποσότητα ύλης είναι μία ουσία, η οποία όταν βρίσκεται σε ηρεμία, έχει συγκεκριμένη μάζα και καταλαμβάνει χώρο με τον όγκο της. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, τα αντικείμενα απαρτίζονται από ποσότητες ύλης που γίνονται αντιληπτές από τις αισθήσεις. Κατά την μοντέρνα Φυσική, η ύλη διαιρείται σε επιμέρους δομικά στοιχεία. Πρωταρχικά στα μόρια, τα οποία είναι η μικρότερη δυνατή ποσότητα του υλικού που διατηρεί τις ιδιότητες του, και ύστερα στα άτομα, τα οποία αποτελούν το μικρότερο σωματίδιο ενός χημικού στοιχείου το οποίο διατηρεί τις χημικές του ιδιότητες. Τα άτομα απαρτίζονται με τη σειρά τους από τα θεμέλια συστατικά της ύλης, τα υποατομικά σωματίδια.

Αναλόγως με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στις οποίες συναντάται ένα καθαρό υλικό, δηλαδή μία ποσότητα ύλης με συγκεκριμένες ιδιότητες, αυτό μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις τέσσερις βασικές μορφές που μπορεί να πάρει η ύλη. Υπάρχουν και άλλες, ενδιάμεσες, καταστάσεις οι οποίες μπορούν να απαντηθούν σε ακραίες συνθήκες πίεσης, πυκνότητας, συγκέντρωσης ενέργειας κ.ά., για τις οποίες δεν θα γίνει λόγος στο παρόν. Η κατάσταση ενός μείγματος υλικών εξαρτάται από τις επιμέρους καταστάσεις των συστατικών του.

Οι καταστάσεις αυτές, καθώς και οι ιδιότητες τους, είναι οι εξής:

Στερεή: Σε αυτήν την κατάσταση τα μόρια του υλικού διατηρούν σταθερή θέση στον χώρο, λόγω ισχυρών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ τους, οπότε δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα, παρά μόνο να δονηθούν. Σαν αποτέλεσμα, τα στερεά υλικά έχουν συγκεκριμένο σχήμα και όγκο, ανεξαρτήτως του δοχείου-σταθερού περιβλήματος στα οποία μπορεί να είναι τοποθετημένα.

Υγρή: Στην υγρή κατάσταση, τα μόρια βρίσκονται σε κοντινή θέση μεταξύ τους, αλλά οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους δεν είναι αρκετά ισχυρές ώστε να τα



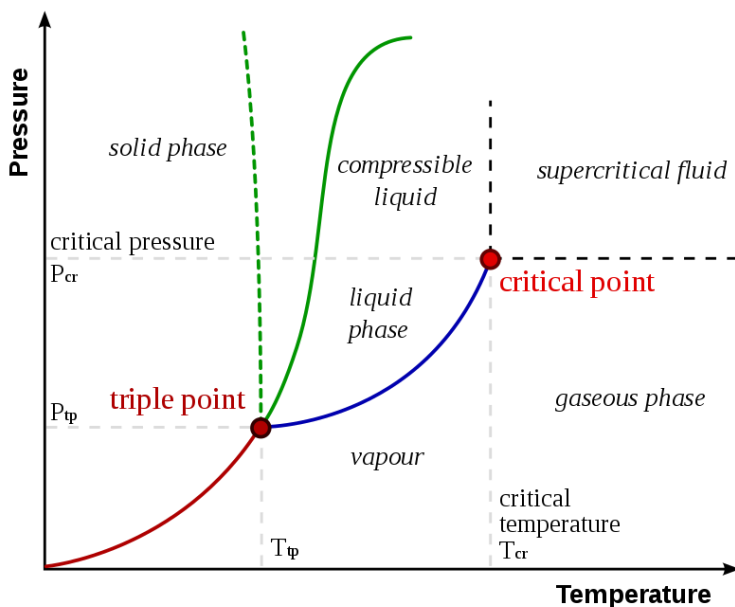
συγκρατήσουν σε σταθερές θέσεις. Τα περισσότερα υγρά είναι σχεδόν ασυμπίεστα ρευστά, οπότε έχουν σχεδόν σταθερό όγκο ανεξαρτήτως πίεσης, ενώ λαμβάνουν το σχήμα του δοχείου στο οποίο βρίσκονται.

Αέρια: Στα αέρια τα μόρια κινούνται ελεύθερα και μπορούν να καταλάβουν όλο το διαθέσιμο χώρο. Είναι συμπιεστά ρευστά και τα μόριά τους διαθέτουν αρκετή κινητική ενέργεια έτσι ώστε να μην είναι εφικτό να αναπτυχθούν σημαντικές δυνάμεις μεταξύ τους.

Πλάσμα: Το πλάσμα έχει τις ιδιότητες του αερίου, μόνο που επιπλέον είναι ηλεκτρικά αγώγιμα, αφού σε αυτή την κατάσταση η ύλη αποτελείται από ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια και κατιόντα. Αυτό συμβαίνει διότι για να βρεθεί η ύλη σε αυτή την κατάσταση σημαίνει ότι έχουν προσδοθεί τόσο μεγάλα ποσά θερμότητας σε αυτή, που πλέον τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων εγκαταλείπουν τα άτομα και έτσι δημιουργούνται θετικά φορτισμένα άτομα. [2] [14] [15]

## 2.2 Αλλαγή Φάσης

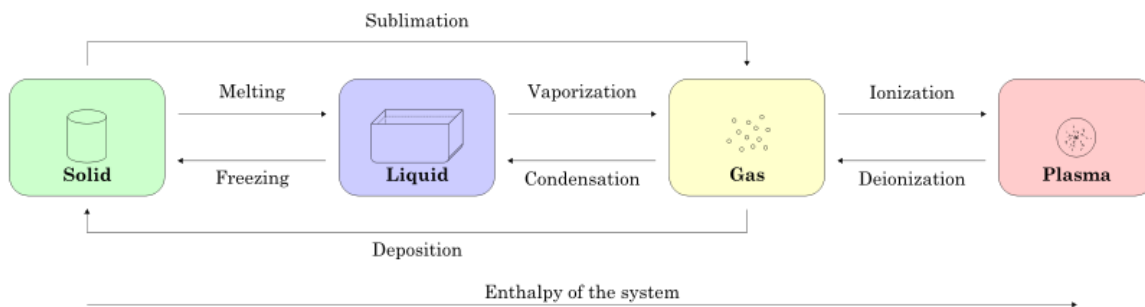
Στην Θερμοδυναμική, φάση καλείται ένα θερμοδυναμικό σύστημα στο οποίο διατηρούνται ομοιόμορφα όλες οι φυσικές ιδιότητες του υλικού. Οι όροι «φάση ενός υλικού» και «κατάσταση της ύλης» μπορούν να χρησιμοποιηθούν συχνά ως συνώνυμοι, όμως για μία κατάσταση ύλης μπορεί να επικρατούν ταυτόχρονα διάφορες διακριτές και αμιγείς φάσεις. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα Διαγράμματα Φάσης, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα «όρια φάσης» που απεικονίζουν και το πως οριοθετούνται από την θερμοκρασία και την πίεση .



Εικόνα 2.2.α Ένα τυπικό διάγραμμα φάσης. Η συνεχής πράσινη γραμμή ισχύει για τα περισσότερα υλικά, ενώ η διακεκομμένη δείχνει την ανώμαλη συμπεριφορά του νερού. Η πράσινη γραμμή ορίζει το σημείο πήξης και η μπλε το σημείο βρασμού, δείχνοντας πως αυτά επηρεάζονται από την πίεση.

Τα διαγράμματα φάσης είναι ουσιαστικά η επαλληλία πολλών πειραματικών αποτελεσμάτων και δείχνουν με σαφήνεια ότι για δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, μπορούν να υπάρχουν μόνο συγκεκριμένες φάσεις. Για να βρεθεί ένα υλικό σε άλλες φάσεις, θα πρέπει να υπάρξει κάποια μεταβολή στις παραπάνω συνθήκες. Όταν συμβαίνει αυτό, τότε συντελείται η λεγόμενη Αλλαγή Φάσης.

Αναλόγως με την φάση στην οποία βρίσκεται ένα υλικό και μία φάση στην οποία απαιτούμε να καταλήξει, υπάρχει κάποιος συνδυασμός μεταβολής των συνθηκών που καθιστούν αυτή την αλλαγή δυνατή, ίσως με κάποιες διαδοχικές αλλαγές φάσης αν χρειαστεί. Αυτή η αλλαγή φάσης έχει πάντα και μία αντίστροφη. [2] [15] [16]



Εικόνα 2.2.β Οι αλλαγές φάσης μεταξύ των καταστάσεων της ύλης και οι ονομασίες τους. Καθώς κινούμαστε από την στερεή κατάσταση προς την κατάσταση του πλάσματος, έχουμε αύξηση της ενθαλπίας του συστήματος.

### 2.3 Λανθάνουσα Θερμότητα Αλλαγής Φάσης

Από τις παραπάνω αλλαγές φάσης, αυτές που αφορούν την παρούσα μελέτη είναι η πήξη, η οποία είναι η αλλαγή από υγρή σε στερεή φάση και η τήξη, η οποία είναι η αντίστροφη της. Για τις μελετώμενες εφαρμογές και λόγω της φύσης των μελετώμενων υλικών, αυτό μπορεί να γίνεται με την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των υλικών με το περιβάλλοντος.

Κατά την τήξη, ένα υλικό προσλαμβάνει θερμότητα από το περιβάλλον του, ενώ κατά την πήξη αποδίδει θερμότητα σε αυτό. Το ποσό αυτής της θερμότητας είναι ίσο για τις δύο αντίστροφες αυτές διαδικασίες. Όταν η θερμοκρασία του υλικού γίνει ίση με εκείνη με εκείνη της μετάβασης από τη μία φάση στην άλλη, σημεία τήξεως και πήξεως για την προκειμένη περίπτωση, τότε αρχίζει η διαδικασία μετατροπής της φάσης. Αυτή η διαδικασία, δεν γίνεται ακαριαία για το σύνολο του υλικού και για αυτό αυτή η μεταβολή

ονομάζεται και αλλαγή πρώτης τάξεως. Όσο το υλικό προσλαμβάνει ή αποδίδει θερμότητα, ένα μέρος του έχει ολοκληρώσει την μεταβολή, ενώ το υπόλοιπο ακολουθεί. Κατά τη διάρκεια αυτής της μετατροπής, η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σταθερή έως ότου αυτή η διαδικασία ολοκληρωθεί.

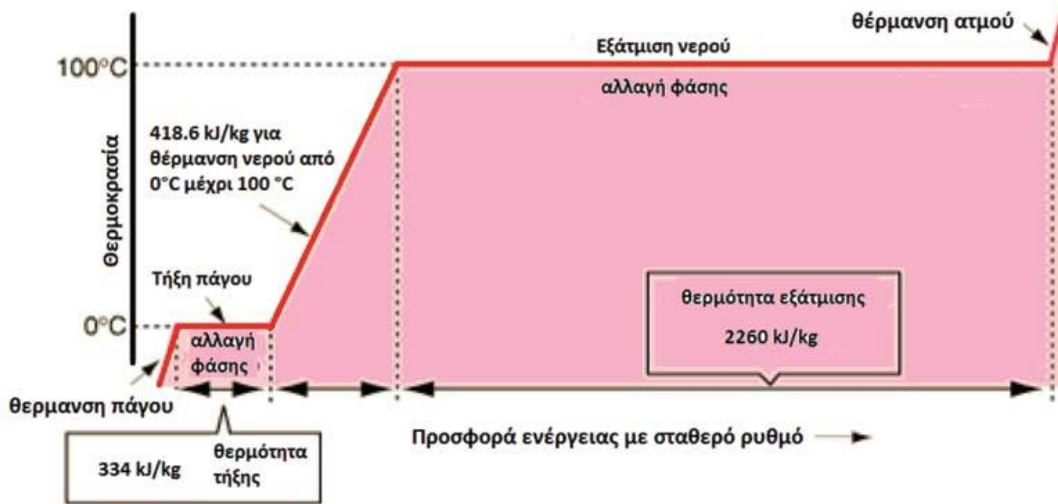
Η θερμότητα λοιπόν που συναλλάσσει το υλικό με το περιβάλλον του κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών δεν είναι αισθητή, καθώς δεν προκαλεί κάποια μεταβολή στη θερμοκρασία του υλικού. Αντ' αυτού, διοχετεύεται εξ ολοκλήρου στην αλλαγή της φάσης του. Λέμε λοιπόν ότι αυτή η θερμότητα αποτελεί την λανθάνουσα θερμότητα της μετάβασης από τη μία φάση στην άλλη.

Πατέρας της θεωρίας της λανθάνουσας θερμότητας θεωρείται ο Joseph Black (1728-1799), Σκωτσέζος φυσικός και χημικός, ο οποίος με πειράματα που πραγματοποίησε κατά το 1761 στο Πανεπιστήμιο της Γλασκόβης έβαλε τις βάσεις για την κατανόηση αυτού του φαινομένου. Θερμαίνοντας κομμάτια πάγου, δεν μπορούσε να παρατηρήσει κάποια μεταβολή στη θερμοκρασία του μείγματος πάγου-νερού που προέκυπτε, αλλά μεταβολή στην ποσότητα του νερού στο μείγμα. Ομοίως, παρατήρησε το ίδιο φαινόμενο θερμαίνοντας νερό και μετρώντας τον παραγόμενο ατμό. Αυτό τον οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η προσδιδόμενη ενέργεια, αφού ήταν αδύνατο να έχει εξαφανιστεί, θα έπρεπε να έχει απορροφηθεί από τα σωματίδια του πάγου ή του νερού, μία λανθάνουσα μορφή θερμότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θεωρία της λανθάνουσας θερμότητας σηματοδοτεί κατά πολλούς την αφετηρία της Επιστήμης της Θερμοδυναμικής. [2] [17]

## 2.4 ΥΑΦ – Ορισμός και Ιδιότητες

Με τον όρο Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) περιγράφονται τα υλικά εκείνα τα οποία κατά τις μεταβολές των φάσεων τους απορροφούν ή αποδίδουν σημαντικές ποσότητες λανθάνουσας θερμότητας, ενώ η θερμοκρασία τους διατηρείται σταθερή. Οι αλλαγές φάσης που μας αφορούν είναι η στερεοποίηση και η υγροποίηση. Η λανθάνουσα θερμότητα είναι ποσοτικά η ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Το πιο απλό υλικό που μπορεί να περιγραφεί ως ΥΑΦ είναι το νερό. Το νερό όταν είναι πάγος, δηλαδή βρίσκεται σε στερεή κατάσταση και σε θερμοκρασία 0 °C, προκειμένου να αλλάξει φάση και να λάβει χώρα η υγροποίηση χρειάζεται να απορροφήσει λανθάνουσα ενέργεια ίση με 334 KJ/Kg. Για την ατμοποίησή του, όταν βρίσκεται στους 100 °C, απαιτείται πρόσδοση λανθάνουσας θερμότητας σε αυτό ίση με 2260 KJ/Kg. Για τις αντίστροφες διαδικασίες, δηλαδή για την στερεοποίηση και την υγροποίηση απαιτούνται τα ίδια ποσά θερμότητας, μόνο που αυτή τη φορά πρέπει να απορριφθούν στο περιβάλλον από το νερό.



Εικόνα 2.4.α Σχηματική απεικόνιση των αλλαγών φάσεων του νερού και τον απαιτούμενων ποσών θερμότητας.

Το νερό όμως δεν χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές, καθώς η χρήση του παρουσιάζει προβλήματα που σχετίζονται με τις ιδιότητές του, όπως η μεγάλη μεταβολή της πυκνότητάς του με τη θερμοκρασία. Υπάρχουν ΥΑΦ όμως με βάση το νερό, τα οποία διατηρούν τις ωφέλιμες ιδιότητές του.

Γίνεται κατανοητό ότι για να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό ως ΥΑΦ σε κάποια εφαρμογή, αυτό θα πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις και να καλύπτει ορισμένα κριτήρια που έχουν να κάνουν με τη φύση της εφαρμογής. Ορίζονται λοιπόν κάποια ιδανικά χαρακτηριστικά των ΥΑΦ:

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα του ΥΑΦ που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Αυτή θα πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων του εύρους θερμοκρασιών της εφαρμογής, αλλιώς το υλικό θα αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα.

Το αμέσως επόμενο στοιχείο στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η λανθάνουσα θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού. Αυτή συνήθως προτιμάται να είναι μεγαλύτερη των 180 J/g και τουλάχιστον μεγαλύτερη των 160 J/g. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο περισσότερη θερμότητα μπορεί να αποθηκεύσει και να αποδώσει το υλικό, ενώ για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, μία υψηλή τιμή της λανθάνουσας θερμότητας σημαίνει ότι χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί μικρότερη ποσότητα υλικού.

Άλλη σημαντική ιδιότητα είναι η θερμοαγωγιμότητα του υλικού. Αν αυτή δεν είναι ικανοποιητική, τότε ίσως η πρόσδοση ή η απορρόφηση ενέργειας από το ΥΑΦ να μην γίνει σε πρακτικά χρονικά πλαίσια.

Για μακροχρόνιες εφαρμογές, όπως είναι και οι περισσότερες, το ΥΑΦ πρέπει να είναι σταθερό ως προς την σύστασή του, έτσι ώστε να διατηρούνται αναλλοίωτες οι ιδιότητές του. Αυτό σημαίνει ότι δεν πρέπει να αντιδρά με το περιβάλλον του, να μη διαχωρίζεται στα συστατικά του, σε περίπτωση που είναι κάποιο μείγμα ΥΑΦ, και να μπορεί να υποστεί πολλούς κύκλους πήξης και τήξης, χωρίς να το επηρεάσουν η συνεχής κρυσταλλοποίηση ή τήξη.

Σημαντική είναι επίσης η έλλειψη κινδύνου υπερψύξης του υλικού. Υπερψύξη καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία του υλικού πέφτει κάτω από το σημείο πήξης του, χωρίς όμως να αρχίσει η διαδικασία της στερεοποίησης. Μελέτες έχουν δείξει πως όταν εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο σε μεγάλο βαθμό, δεν πρέπει να αγνοείται, καθώς αλλοιώνει τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού και συνεπώς τα αποτελέσματα των ερευνών.

Είναι κατανοητό το γεγονός ότι το υλικό πρέπει να είναι ασφαλές ως προς την χρήση του, μη τοξικό ή διαβρωτικό, μη εύφλεκτο ή εκρηκτικό. Για περιβαλλοντικούς λόγους προτιμώνται ανακυκλώσιμα ΥΑΦ.

Τέλος, για να είναι συμφέρουσα η χρήση ενός ΥΑΦ, υπεισέρχονται οικονομικά κριτήρια. Ένα ΥΑΦ θα πρέπει να είναι εύκολο να παραχθεί σε μεγάλες ποσότητες και άμεσα διαθέσιμο, με χαμηλό κόστος. Έτσι, το όφελος από την εφαρμογή του θα πρέπει να υπερκαλύπτει το κόστος παραγωγής του και να είναι συγκρίσιμο με άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ψύξη και την θέρμανση. [18]

# 3

## Κατηγορίες ΥΑΦ

Τα ΥΑΦ, ειδικά αυτά που από στερεή φάση μεταπίπτουν σε υγρή και το αντίστροφο, αναλόγως με τη σύστασή τους ομαδοποιούνται σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Οργανική ύλη θεωρείται αυτή που είναι δομημένη με βάση τον άνθρακα (C) και πρόκειται ουσιαστικά για τη ύλη η οποία προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς. Όλες οι υπόλοιπες ενώσεις, δηλαδή αυτές που δεν περιλαμβάνουν άνθρακα, και τα χημικά στοιχεία είναι αντικείμενο μελέτης της Ανόργανης Χημείας. Μία τρίτη κατηγορία μπορεί να θεωρηθεί αυτή των εύτηκτων μειγμάτων, τα οποία μείγματα μπορεί να είναι αμιγώς οργανικά, ανόργανα ή και συνδυασμός τους.

### 3.1 Οργανικά ΥΑΦ

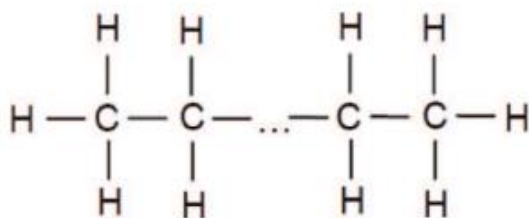
Τα οργανικά ΥΑΦ διαθέτουν ορισμένες ιδιότητες που τα καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλείς επιλογές σε ποικίλες εφαρμογές. Έχουν την ικανότητα να ψύχονται και να λιώνουν επανειλημμένα χωρίς να παρατηρείται διαχωρισμός των φάσεων. Κατά την κρυσταλλοποίηση τους σπάνια εμφανίζεται το φαινόμενο της υπερψύξεως και είναι συνήθως μη διαβρωτικά. [19] Άλλα σημαντικά τους πλεονεκτήματα είναι ότι είναι εμφανίζουν σταθερή θερμική συμπεριφορά και ότι είναι διαθέσιμα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών τήξεως (0 έως 200 °C).

Στον αντίποδα, εμφανίζονται μερικά μειονεκτήματα όταν αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν γενικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, έχουν χαμηλή πυκνότητα, είναι εύφλεκτα και συνήθως ακριβά στην παραγωγή τους. [20]

Τα υλικά αυτά διαχωρίζονται περεταίρω σε δύο σημαντικές κατηγορίες: σε αυτά που περιλαμβάνουν παραφίνες και σε αυτά που δεν περιλαμβάνουν παραφίνες.

#### 3.1.1 Παραφίνες

Οι φυσικές παραφίνες είναι μείγματα καθαρών αλκανίων και έχουν ως γενικό χημικό τύπο τον  $C_nH_{2n+2}$ , όπου  $n$  τα άτομα του άνθρακα. Πρόκειται ουσιαστικά για κορεσμένους υδρογονάνθρακες. Οι κανονικές αυτές παραφίνες έχουν γραμμική ανθρακική αλυσίδα (κανονικά αλκάνια), ενώ υπάρχουν και το ισοαλκάνια ή αλλιώς ισοπαραφίνες.



Εικόνα 3.1.1.α Η χημική δομή του κανονικού αλκανίου.

Σε κανονικές συνθήκες, τα κατώτερα μέλη των αλκανίων ( $C_1$ - $C_4$ ) είναι αέρια, άχρωμα, άοσμα και αδιάλυτα στο νερό. Τα μέσα μέλη ( $C_5$ - $C_{16}$ ) είναι υγρά με χαρακτηριστική οσμή πετρελαίου, ενώ τα ανώτερα μέλη ( $C_{17}$  και άνω) είναι στερεά, άχρωμα με χαρακτηριστική υφή κεριού. [21] Το σημείο τήξεως τους παρουσιάζει σχεδόν γραμμική εξάρτηση από το μέγεθος του μορίου και αυτό γιατί είναι κυρίως συνάρτηση του βάρους του μορίου, οπότε για τα ανώτερα μέλη το σημείο τήξεως είναι αρκετά υψηλό, αλλά αυξάνεται με χαμηλό ρυθμό καθώς αυξάνεται το μέγεθος του μορίου. Αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι και η λανθάνουσα θερμοκρασία τήξης. [19] [22]

Οι παραφίνες με την πιο διαδεδομένη χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας είναι οι στερεές, δηλαδή τα κεριά παραφινών. Αυτά περιλαμβάνουν κυρίως γραμμικές αλυσίδες αλκανίων, οι οποίες έχουν θερμοκρασία τήξεως στο εύρος των 23 με 67 °C.

Έτσι ώστε να αποδειχθεί το κατά πόσο είναι θερμικά σταθερές τέτοιες παραφίνες, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας, έχουν πραγματοποιηθεί ποικίλες έρευνες.

Σε μία μελέτη από τις αρχές της δεκαετίας του '90, παραφίνες διαφορετικών συστάσεων μελετήθηκαν για τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, αφού υποβλήθηκαν σε λειτουργία 900 θερμικών κύκλων.

Type	Molecular weight	C (%)	H (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Oil content (%)
A ( $C_{22.2}H_{44.1}$ )	311	85.80	14.19	0.7536	2.09
B ( $C_{23.2}H_{48.4}$ )	327	85.13	14.84	0.7554	1.89
C ( $C_{24.7}H_{51.3}$ )	348	85.25	14.75	0.7593	8.67

Πίνακας 3.1.1.α Τα υλικά υπό μελέτη και οι φυσικές τους ιδιότητες.

Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι στα υλικά A και B δεν εμφανίστηκε κάποια εμφανής υποβάθμιση της δομής τους μετά από του 900 κύκλους και ότι το υλικό C εμφάνισε χαμηλή ενθαλπία, αλλά μεγάλο εύρος στη μεταβολή της φάσης του. [23]

Σε μια αντίστοιχη μελέτη από τους Shukla et al. [24] , δοκιμάστηκαν τρεις παραφίνες A, B και C βάσει του σημείου τήξεως τους, το οποίο παρατηρήθηκε να είναι 58, 62 και 54

°C αντίστοιχα. Τα υλικά Α και Β υποβλήθηκαν 600 θερμικούς κύκλους λειτουργίας και παρατηρήθηκε ότι εμφάνιζαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη σημείο τήξεως και τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης τους καθώς οι θερμικοί κύκλοι αυξάνονταν. Για το τρίτο υλικό όμως, παρουσίασε μεγαλύτερη σταθερότητα, ακόμη και για περισσότερους από 1500 κύκλους λειτουργίας.

Για μία εφαρμογή ηλιακής θέρμανσης χώρου, μελετήθηκε ένα μείγμα παραφίνης (70% κ.β.) και πολυπροπυλενίου (30% κ.β.) ως συμπληρωματικό-βοηθητικό υλικό. Μετά από 3000 επιταχυμένους θερμικούς κύκλους στους οποίους υποβλήθηκε, παρουσίασε ελάχιστες τροποποιήσεις στις θερμικές του ιδιότητες και κρίθηκε αρκετά αξιόπιστο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. [25]

### 3.1.2 Μη Παραφινούχα Υλικά

Τα οργανικά ΥΑΦ που δεν περιλαμβάνουν παραφίνες, ή αλλιώς οι μη-παραφίνες, είναι τα ΥΑΦ που βρίσκονται σε μεγαλύτερη διαθεσιμότητα. Υποκατηγορίες τους είναι τα λιπαρά οξέα και οι εστέρες με τις αλκοόλες, τις γλυκόλες κ.ά., με σαφώς σημαντικότερη αυτή των λιπαρών οξέων.

Τα λιπαρά οξέα είναι κορεσμένες ή ακόρεστες μακριές αλυσίδες άνθρακα μονοκαρβοξυλικών οξέων. Το πλεονέκτημα που εμφανίζουν σε σχέση με άλλες μη-παραφίνες έγκειται στο γεγονός ότι παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία θερμοκρασιών τήξεως που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές. Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι επίσης η μικρή μεταβολή στον όγκο τους και η υψηλή τους λανθάνουσα θερμότητα τήξεως.

Παράγονται εύκολα από φυτικά και ζωικά έλαια, οπότε η παραγωγή τους είναι ανεξάρτητη από την αφθονία των υδρογονανθράκων και την εξόρυξη καυσίμων, σε αντίθεση με τις παραφίνες. Τα πιο συνήθη λιπαρά οξέα που χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση θερμότητας είναι το στεαρικό (stearic), το παλμιτικό (palmitic), το λαουρικό (lauric) και το μυριστικό (myristic) οξύ. Μερικά από αυτά τα οξέα και οι ιδιότητές τους, όπως αυτές προέκυψαν από διάφορες μελέτες, παρουσιάζονται παρακάτω:



PCM	Melting point (°C)	Latent heat (J/g)
Acetamide ( $\text{CH}_3\text{CONH}_2$ )	82.15	262.78
	82	263
Acetanilide ( $\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}$ )	113	169.4
Capric acid (55 wt%)+expanded perlite (45 wt%)	31.80	98.12
Erythritol	117	339
Lauric acid ( $\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$ )	43.5	169.3
	42.46	176.6
	42.6	211.6
Methyl palmitate	29	215
Methyl stearate	37.8	270
Myristic acid ( $\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$ )	50.4	189.4
	52.99	181.0
	53.8	192.0
Palmitic acid ( $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$ )	61.2	196.1
	57.8	201.2
	61.31	197.9
	59.9	197.9
Palmitic acid (80 wt%)+expanded graphite (20 wt%)	60.88	148.36
Stearic acid ( $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ )	65.2	209.9
	62.59	154.63
	54.7	159.3
	53.8	174.6
	63	155
Urea	133	250

Πίνακας 3.1.2.α Μη-παραφίνες που έχουν μελετηθεί ως προς την σταθερότητα των θερμικών τους ιδιοτήτων [19]

Από τα παραπάνω, τα παλμιτικά οξέα με σημείο τήξεως περί τους 60 °C δείχθηκε από μελέτες ότι παρουσιάζουν ανεπαίσθητη υπερψύξη κατά την ψύξη τους. [26] Τριών ειδών οξέα, παλμιτικά, μυριστικά και στεαρικά με αντίστοιχα σημεία τήξεως 50-54 °C, 58-62 °C και 65-69 °C, όταν υποβλήθηκαν σε 450 θερμικούς κύκλους σε άλλη μελέτη, φάνηκε να έχουν μικρή ογκομετρική διαστολή, της τάξης του 10%, ενώ η θερμοχωρητικότητά τους υπέστη επίσης μία μικρή απώλεια της τάξης του 10% μετά το πέρας των κύκλων. [27]

Στα υπόλοιπα υλικά, ενδιαφέρον παρουσιάζουν η ερυθριτόλη (erythritol) και το καπρικό οξύ (capric acid), τα οποία αποδείχθηκε ότι διατηρούν τις θερμικές τους ιδιότητες για περισσότερους από 1000, ακόμη και 5000 κύκλους κατά περίπτωση. [24] [28] Επίσης, έρευνα σε μία ποικιλία από τέτοια υλικά (στεαρικό οξύ με σ.τ. 54,7 °C, παλμιτικό οξύ με σ.τ. 61,31 °C, μυριστικό οξύ με σ.τ. 53 °C και λαουρικό οξύ με σ.τ. 42,46 °C) απεφάνθη ότι βιομηχανικά υλικά όπως αυτά τείνουν να έχουν ελάχιστα μεταβλητές θερμικές ιδιότητες. Για αυτόν τον λόγο, προτείνεται να υπόκεινται σε επιταχυμένες θερμικές δοκιμές πριν τη χρήση τους, έτσι ώστε να εξακριβωθεί η θερμική τους συμπεριφορά. [28]

## 3.2 Ανόργανα ΥΑΦ

Τα ανόργανα υλικά, όπως δηλώνει η ονομασία τους, παρουσιάζουν παντελή απουσία οργανικών ενώσεων. Αυτά εκπροσωπούνται κυρίως από τα ένυδρα άλατα, ενώ στην κατηγορία των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης εμπίπτουν και κάποια μεταλλικά ΥΑΦ.

### 3.2.1 Ένυδρα Άλατα

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να περιγραφούν από τον γενικό χημικό τύπο  $\text{AB} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , όπου  $n$  ο αριθμός μορίων νερού, τα οποία καθορίζουν και το είδος του άλατος. Παρουσιάζουν

σχετικά μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 250 KJ/Kg) και σχετικά μεγάλη τιμή συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (περίπου 0,60 W/mK), κάτι που τα καθιστά υποψήφια ΥΑΦ.

Κατά την αλλαγή της φάσης του, το άλας όταν τήκεται αφυδατώνεται, ομοιομορφα, ανομοιομορφα ή με μία ενδιάμεση κατάσταση. Αποβάλλει ξανά θερμότητα κατά την αντίστροφη διαδικασία, με επανακρυστάλλωση του αποβλημένου νερού. Για τα περισσότερα άλατα με μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης και μέτρια θερμοκρασία αλλαγής φάσης, αυτό γίνεται ανομοιομορφα. Αυτό οδηγεί σε εύκολο διαχωρισμό των φάσεων του υλικού και πιθανή δημιουργία άνυδρων ιζημάτων άλατος, κάτι που με τη σειρά του οδηγεί αναπόφευκτα σε εκφυλισμό των θερμικών ιδιοτήτων του μείγματος. Με το πέρας αρκετών θερμικών κύκλων στους οποίους θα υποβληθεί ένα τέτοιο υλικό, μειώνεται ολοένα και περισσότερο η αποθηκευτική τους ικανότητα και εξασθενούν οι θερμικές τους ιδιότητες.

Αναζητούνται λοιπόν ανόργανα ένυδρα άλατα, τα οποία παρουσιάζουν ομοιομορφη αλλαγή φάσης, χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης υπερψύξεως και ανταγωνιστικά οικονομικά δεδομένα της παραγωγής τους. Πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη ότι είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά και ότι είναι εύκολη η πλήρης ή μερική αφυδάτωσή τους λόγω της πίεσης των ατμών του νερού. Σημαντικό τους πλεονέκτημα έναντι των άλλων ΥΑΦ πάντως είναι η μεγάλη πυκνότητα που παρουσιάζουν υλικά, κάτι που αποφέρει αυξημένες τιμές αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου και ιδανικά για εφαρμογές με περιορισμένο χώρο δράσης.

Τα πλέον μελετημένα τέτοια υλικά είναι το χλωρίδιο του ασβεστίου ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  / calcium chloride), το θειικό άλας νατρίου ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  / sodium sulfate decahydrate / γνωστό και ως άλας Glauber), το φωσφορικό νάτριο (sodium phosphate) κ.ά. [29]

Salt Hydrates	Melting Temperature (°C)	Heat of Fusion (J/g)
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	8	253
KF·4H <sub>2</sub> O	19	231
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	25.8	125.9
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	28	174
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	256
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32.4	248
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	33	247
CaBr <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	34	115.5
LiBr <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	34	124
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	35–44	280
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	36	149.6
KF·2H <sub>2</sub> O	42	162
MgI <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	42	133
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	42.4	
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·9H <sub>2</sub> O	47	155
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·4H <sub>2</sub> O	48	168
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	48	99
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	48.5	202
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	49	220
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	51	104
FeCl <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	56	90
Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	57	169
CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O	58	226–264
MgCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	58	178
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	65–69	190
LiCH <sub>3</sub> COO·2H <sub>2</sub> O	70	150
Na <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·12H <sub>2</sub> O	70	184
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	78	266
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	89	
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	89.3	150
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	89.9	163
NH <sub>4</sub> Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	95	269
Al <sub>2</sub> (SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	112	
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	117	167

Πίνακας 3.2.1.α Μερικά ένυδρα άλατα που έχουν μελετηθεί ως προς τις θερμικές τους ιδιότητες [29]

### 3.2.2 Μεταλλικά ΥΑΦ

Ως ΥΑΦ μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξεως, καθώς για τα περισσότερα μέταλλα αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό και ξεπερνά τις απαιτήσεις των περισσότερων εφαρμογών. Τα μεταλλικά ΥΑΦ δεν χρησιμοποιούνται συχνά λόγω της υψηλής τους πυκνότητας, κάτι που τα καθιστά αρκετά βαριά και δύσχρηστα. Όταν όμως υπάρχει μεγάλος περιορισμός του διαθέσιμου χώρου, τότε αυτά μπορούν να προτιμηθούν λόγω της μεγάλης θερμότητας τήξης τους αναλογικά με τον όγκο τους. Ως μέταλλα, παρουσιάζουν επίσης το θετικό της μεγάλης αγωγιμότητας. Εμπίπτουν συνήθως στην κατηγορία των εύτηκτων μειγμάτων. [19]

### 3.3 Εύτηκτα Μείγματα

Ως εύτηκτο μείγμα ορίζεται το ομοιογενές μείγμα υλικών, το οποίο παρουσιάζει χαμηλότερο σημείο τήξης από αυτό των επιμέρους συστατικών του, κάτι που συνήθως αποδίδει σημεία τήξεως αρκετά χαμηλά στη θερμοκρασιακή κλίμακα.

Ένα πλεονέκτημα που εμφανίζουν τέτοια μείγματα, πέρα του εύκολου προσδιορισμού του σημείου τήξεως τους, είναι ότι δεν εμφανίζουν διαχωρισμό των φάσεων λόγω της

σύνθετης κρυσταλλικής δομής που αναπτύσσουν τα συστατικά τους κατά την αλλαγή της φάσης. Σημαντικό μειονέκτημα, όμως, θεωρείται το υψηλό κόστος παραγωγής τους, έως και τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό των απλών οργανικών ή ανόργανων ΥΑΦ.

Τα πιο συνήθη τέτοια μείγματα χρησιμοποιούνται σε κτιριακές εφαρμογές και αντιμετωπίζονται όπως τα ένυδρα άλατα, καθώς έχουν παραπλήσια συμπεριφορά.

ΥΛΙΚΟ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ
	ΤΗΞΗΣ ( °C )	ΤΗΞΗΣ ( kJ/kg )
66.6% $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 33.3% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	127
48% $\text{CaCl}_2$ + 4.3% $\text{NaCl}$ + 0.4% $\text{KCl}$ + 47.3% $\text{H}_2\text{O}$	26.8	188
47% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ + 53% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30	200.5

Πίνακας 3.3.α Τα πιο συνηθισμένα εύτηκτα μείγματα ΥΑΦ [30]

# 4

## Τρόποι Ένταξης ΥΑΦ σε Εφαρμογές - Εφαρμογές ΥΑΦ

### 4.1 Γενικά

Αναλόγως με τα χαρακτηριστικά που διαθέτει ένα ΥΑΦ, όπως αυτό της θερμοκρασίας τήξεως ή της ειδικής θερμοχωρητικότητάς του, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποια από τις ποικίλες εφαρμογές στις οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν τέτοια υλικά. Η χρήση τους μπορεί να βελτιώσει αισθητά την απόδοση των υπαρχόντων ενεργειακών συστημάτων ή να τους προσδώσει νέες δυνατότητες. [31]

### 4.2 Ενσωμάτωση ΥΑΦ στα Δομικά Υλικά

Μεγάλο ποσοστό της έρευνας που πραγματοποιείται γύρω από τα ΥΑΦ τις τελευταίες δεκαετίες επικεντρώνεται στην ενσωμάτωσή τους στα γνωστά και ευρέως διαδεδομένα δομικά υλικά, καθώς και στα οφέλη που προκύπτουν από αυτή. Μερικές από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 4.2.1 Άμεση Ενσωμάτωση – Direct Incorporation

Κατά την παραγωγή δομικών υλικών όπως ο γύψος και το τσιμέντο, υλικά αλλαγής φάσης σε υγρή μορφή ή σε μορφή σκόνης προστίθενται στο συνολικό μείγμα. Αυτή η μέθοδος αποτελεί ίσως και την πιο οικονομική, αφού δεν απαιτείται η χρήση κάποιου επιπλέον ειδικού εξοπλισμού ή προεργασίας για την ενσωμάτωση των ΥΑΦ. [32]

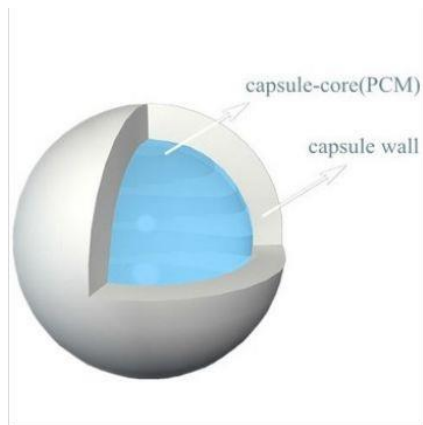
#### 4.2.2 Απορρόφηση – Immersion

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο, το ΥΑΦ αρχικά θερμαίνεται ώστε να βρίσκεται σε υγρή μορφή. Έπειτα, πορώδη δομικά υλικά όπως γυψοσανίδες, τούβλα και τσιμεντόλιθοι εμβαπτίζονται στο λιωμένο ΥΑΦ και το απορροφούν διαμέσου των πόρων τους. Μετά το πέρας κατάλληλου χρονικού διαστήματος, τα δομικά υλικά απομακρύνονται από το λιωμένο ΥΑΦ και αφήνονται να ψυχθούν, μια διαδικασία που εγκλωβίζει το ΥΑΦ στους πόρους τους. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι απλά δομικά υλικά μπορούν να μετατραπούν σε δομικά υλικά με ΥΑΦ πρακτικά οπουδήποτε και οποτεδήποτε, αρκεί να υπάρχουν τα μέσα ώστε να θερμανθεί το ΥΑΦ κατά την προεργασία. [32] Σημαντικός όμως είναι ο κίνδυνος να υπάρξει διαρροή του ΥΑΦ από το πορώδες υλικό με το πέρασμα των χρόνων. [33]

#### 4.2.3 Ενθυλάκωση – Encapsulation

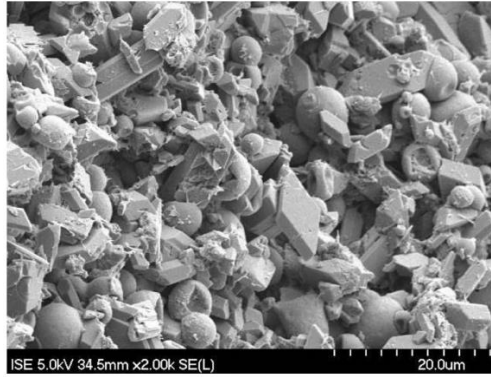
Για την αποφυγή αντιδράσεων μεταξύ των ΥΑΦ και των δομικών υλικών στα οποία προορίζεται να ενσωματωθούν, συνιστάται η ενθυλάκωση, δηλαδή ο εγκιβωτισμός τους σε συσκευασίες που μπορούν να τις αποτρέψουν. Αυτό είναι απαραίτητο όταν τα ΥΑΦ είναι διαβρωτικά ή τοξικά. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι ενθυλάκωσης: η μακρο-ενθυλάκωση (macro-encapsulation) και η μικρο-ενθυλάκωση.

Κατά την πρώτη μέθοδο, το ΥΑΦ συσκευάζεται αρχικά σε κάποιου είδους δοχείο, όπως σωλήνες, σφαίρες, σακούλες, πλαίσια κ.ά. και έπειτα τα δοχεία με το ΥΑΦ ενσωματώνονται σε κάποιο δομικό υλικό. Ενώ μελέτες έχουν δείξει ότι η μέθοδος αυτή αποφέρει σημαντικές βελτιώσεις ως προς τα θερμικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών, παραμένει αρκετά δυσπρόσιτη και δαπανηρή λόγω των δυσκολιών που υφίστανται στην παραγωγή τέτοιων υλικών και της επιπρόσθετης προσοχής που πρέπει να δοθεί στην καταπόνηση των δοχείων. [32]



Εικόνα 4.2.3.α Απεικόνιση ενός εγκιβωτισμένου σωματιδίου PCM. Το τοίχωμα του δοχείου (capsule wall) πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, έτσι ώστε το ΥΑΦ στο εσωτερικό του να δρα ομαλά.

Για τη μέθοδο της μικρο-ενθυλάκωσης χρησιμοποιούνται πολυμερικές μεμβράνες με υψηλό μοριακό βάρος, στις οποίες εγκλείονται μικρά σωματίδια του ΥΑΦ. Οι πολυμερικές μεμβράνες πρέπει να είναι συμβατές τόσο με τα ΥΑΦ όσο και με τα δομικά υλικά. Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου αποτελούν η εύκολη εφαρμογή της, η διευκόλυνση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των υλικών λόγω της αύξησης των επιφανειών συναλλαγής και η δυσκολία καταστροφής τους λόγω καταπονήσεων. Σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί ο κίνδυνος μείωσης της μηχανικής αντοχής της κατασκευής. [32] [34]



Εικόνα 4.2.3.β Μικρο-ενθυλάκωση ΥΑΦ σε γύψο. Οι μικρο-κάψουλες έχουν μέση διάμετρο 8  $\mu\text{m}$  και είναι ομοιογενώς διασκορπισμένες μεταξύ των κρυστάλλων του γύψου [33]

#### 4.2.4 Πολυστρωματική Σανίδα ΥΑΦ – Laminated PCM Board

Τα ΥΑΦ μπορούν να ενταχθούν στο κτιριακό κέλυφος, κυρίως στην εσωτερική επένδυση του τοιχώματος, με την ενσωμάτωσή τους σε πολυστρωματικές πλαστικές οικοδομικές σανίδες. Έρευνες που έκαναν χρήση τέτοιων σανίδων έδειξαν ότι η ένταξή τους στο σύστημα επιφέρει σημαντικά θερμικά οφέλη και βελτίωση των συνθηκών θερμικής ροής σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα που δεν τις χρησιμοποιούσαν:

- Μείωση έως και 17% της θερμικής επαναφοράς του συστήματος
- Αύξηση της θερμικής ροής από 20 έως 50 %
- Αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας κατά 7 έως 18%

[32] [35] [36]

### 4.3 Κτιριακές Εφαρμογές

Αφού κατέστη σαφής ο τρόπος με τον οποίο τα ΥΑΦ μπορούν να ενσωματωθούν στα δομικά υλικά, θα ακολουθήσει μία αναλυτικότερη αναφορά για τα μέρη του κτιρίου στα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέτοια υλικά. Γενικά, η χρήση των ΥΑΦ στα κτίρια έχει ως σκοπό την παραγωγή θέρμανσης και ψύξης. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω φυσικών πόρων όπως η ηλιακή ενέργεια, είτε μέσω τεχνητών πηγών θέρμανσης ή ψύξης. Ως αποθηκευτικά μέσα ενέργειας, θα πρέπει τα θερμικά χαρακτηριστικά τους να είναι συμβατά με τα υπάρχοντα δεδομένα κατά περίπτωση.

#### 4.3.1 Τοιχοποιία

Οι τοίχοι με ΥΑΦ είναι μία εφαρμογή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας η οποία συμβάλλει στη βελτίωση της θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων και μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές δαπάνες του κτιρίου.

Δομικά υλικά όπως οι γυψοσανίδες και το τσιμέντο, αφού ενσωματωθούν σε αυτά ΥΑΦ, μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια υπό τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Καθώς αυτά τα υλικά θερμαίνονται, αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμική ενέργεια την οποία χρησιμοποιούν κατά την αλλαγή της φάσης τους και τη διατηρούν για όσο βρίσκονται σε υγρή μορφή. Όταν οι περιβαλλοντικές τους συνθήκες το επιτρέψουν και αυτά ψυχθούν, τότε αποβάλουν την αποθηκευμένη θερμότητα, έτσι ώστε να επαναστερεοποιηθούν. Για την ψύξη, ωφέλιμο είναι το γεγονός ότι τα υλικά αυτά αποθηκεύουν ενέργεια όταν αυτή βρίσκεται σε περίσσεια, ενώ για τη θέρμανση ότι την αποδίδουν όταν απαιτούνται θερμαντικά φορτία.

Όσο αφορά την ψύξη του κτιρίου, η διαδικασία αυτή μεταθέτει θερμικά φορτία από τις ώρες αιχμής στις οποίες επικρατούν οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο εξωτερικό περιβάλλον, σε χρονικές περιόδους που οι εξωτερικές συνθήκες είναι πιο ήπιες. Άμεσο επακόλουθό αυτού είναι ότι οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου μειώνονται και συνεπώς ελαττώνονται τα ψυκτικά φορτία και η κατανάλωση ενέργειας για τον κλιματισμό του κτιρίου. Αυτό έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη χρονική



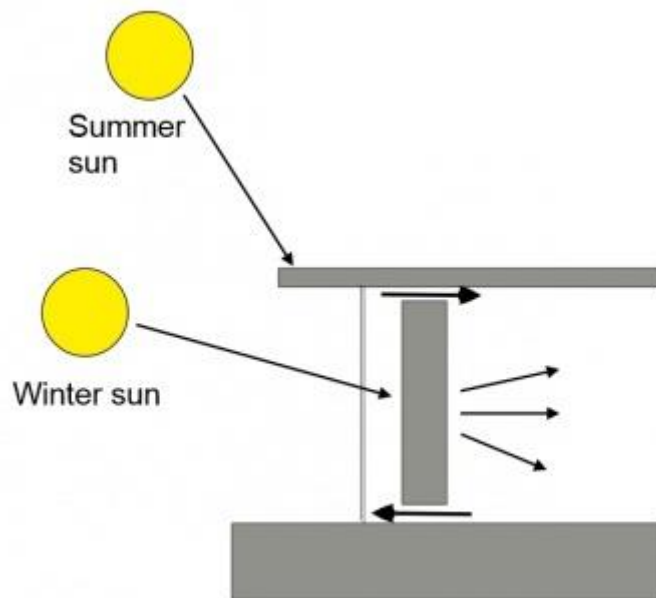
καθυστέρηση της εμφάνισης του μεγίστου θερμοκρασιακού επιπέδου στο εσωτερικό του κτιρίου, κάτι που με τη σειρά του μπορεί να είναι ωφέλιμο, αφού μετατίθενται οι ενεργειακές απαιτήσεις για κλιματισμό από τις ώρες αιχμής σε ώρες με χαμηλότερη ζήτηση. Για την θέρμανση ισχύουν τα αντίστοιχα.

Μιας και η εφαρμογή ΥΑΦ στην τοιχοποιία αποτελεί αντικείμενο μελέτης του παρόντος, μελέτες και αποτελέσματα ερευνών πάνω σε αυτό το αντικείμενο θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

#### 4.3.2 Ηλιακοί Τοίχοι

Οι ηλιακοί τοίχοι με ΥΑΦ είναι τοίχοι που μοιάζουν με τους ηλιακούς τοίχους Trombe, αλλά η λειτουργία τους βασίζεται στην ύπαρξη του υλικού που έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα και όχι στη λιθοδομή τους.

Οι τοίχοι Trombe εμπίπτουν στην κατηγορία των παθητικών ηλιακών συστημάτων και χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση κτιρίων σε ψυχρά κλίματα και περιοχές με αρκετή ηλιοφάνεια. Πρόκειται για πλίνθινους τοίχους που τοποθετούνται στη νότια πλευρά του κτιρίου και σε απόσταση μερικών εκατοστών από την επιφάνεια τους τοποθετείται και μια διαφανής κατασκευή, συνήθως γυάλινη ή πλαστική. Η ηλιακή ενέργεια δεσμεύεται σε αυτό το κενό που δημιουργείται μεταξύ του τοιχώματος και της υαλοκατασκευής. Φέρουν συχνά μαύρο χρωματισμό έτσι ώστε να απορροφούν όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου να αποθηκεύουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας στη μάζα τους. Οι τοίχοι αυτοί, αποδίδουν με τη σειρά τους την αισθητή θερμότητα που αποθηκεύουν στους εσωτερικούς χώρους γύρω από τους οποίους είναι εγκατεστημένοι σε βάθος αρκετών ωρών, από τη στιγμή που ξεκινήσει αυτή η διαδικασία. [30] [37] Επικουρικά, μπορεί να υπάρχει και σύστημα αερισμού του διακένου μεταξύ τοίχου και υαλοκατασκευής, το οποίο θερμαίνει τον εσωτερικό χώρο μέσω μεταφοράς.



Εικόνα 4.3.1.α Τυπική μορφή τοίχου Trombe. Κατασκευάζεται έτσι ώστε τους θερινούς μήνες που δεν είναι αναγκαία η ύπαρξή του, η ηλιακή ακτινοβολία να μην προσπίπτει σε αυτόν κατά τις μεσημβρινές ώρες. [38]

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια ένταξης των ΥΑΦ σε τέτοιους τοίχους, καθώς αυτό αυξάνει τη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα του όγκου τους, καθώς πέρα από την αισθητή θερμότητα, πλέον μπορούν να αποθηκεύουν και λανθάνουσα θερμότητα.

Ομοίως με τους απλούς τοίχους με ΥΑΦ, καθώς θερμικά φορτία αποδίδονται στο κτίριο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ακόμη και της νύχτας, μέσω της αποβολής της λανθάνουσας θερμότητας από τους ηλιακούς τοίχους, επιτυγχάνονται ευκολότερα τα όρια θερμικής άνεσης και μειώνονται οι δαπάνες για θέρμανση. [37]

#### 4.3.3 Παράθυρα

Τα παράθυρα αποτελούν την κύρια πηγή εισροής θερμικών φορτίων στα κτίρια, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που τα διαπερνά ή λόγω της χαμηλής τους θερμοχωρητικότητας. Αναζητούνται λοιπόν τρόποι βελτίωσης των θερμικών τους χαρακτηριστικών έτσι ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές δαπάνες για την ψύξη των κτιρίων. Παράλληλα, είναι από τις σημαντικότερες πηγές θερμικών απωλειών των κτιρίων, όταν ζητούμενο είναι η θέρμανσή τους.

Ένας τρόπος με τον οποίο ένα απλό παράθυρο μπορεί να μετατραπεί σε ενεργειακά αποδοτικό, είναι με τη χρήση παραθυρόφυλλων με ΥΑΦ. Όταν κατά τη διάρκεια της ημέρας προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία σε αυτά, ενώ διατηρούνται κλειστά, αυτά την μετατρέπουν σε λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης και την αποδίδουν στον χώρο

αργότερα, όταν ψυχθούν. Η λειτουργία τους δηλαδή είναι όμοια με αυτή των τοίχων με PCM. [39]

Ένας άλλος τρόπος που προτείνεται από ερευνητές, είναι η χρήση δύο υαλοπινάκων με ΥΑΦ ανάμεσά τους. Σε συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με έναν απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα, το ενεργειακό παράθυρο εμφάνισε μείωση της τάξης του 30% των θερμικών απωλειών όταν αυτό ήταν τοποθετημένο σε τοίχους νότιου προσανατολισμού. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση 50% των θερμικών κερδών λόγω ηλιακής ενέργειας του συγκεκριμένου κτιρίου. [40]

#### 4.3.4 Δάπεδα

Ένα ακόμη μέρος του κτιριακού κελύφους στο οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν δομικά υλικά με ΥΑΦ είναι τα δάπεδα. Μία μέθοδος που ακολουθείται, είναι η τοποθέτηση πάνελ με κοιλότητες, οι οποίες πληρούνται με ΥΑΦ.



Εικόνα 4.3.4.α Πάνελ με κοιλότητες προς χρήση ως δάπεδα με ΥΑΦ. [41]

Η χρήση τέτοιων δαπέδων σε περιοχές με αρκετά θερμές εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος, έχει δείξει ότι βελτιώνουν τη θερμική άνεση των κτιρίων λόγω της μείωσης των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους και την αύξηση της χρονικής καθυστέρησης για την εμφάνιση των μεγίστων τιμών της. [41]

Όσο αφορά τις εφαρμογές θέρμανσης με χρήση τέτοιων δαπέδων, μελέτες δείχνουν ότι αυτές είναι πιο αποτελεσματικές για ελαφριές κατασκευές. Τα συστήματα αυτά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να αποθηκεύσουν από 5 έως και 14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα του όγκου τους σε σύγκριση με συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως αυτά που βασίζονται στο νερό και τις λιθοδομές τους. [42] [43]

#### 4.3.5 Οροφές

Ως οροφή ορίζεται η εσωτερική επένδυση της σκεπής του κτιρίου, το ταβάνι δηλαδή των εσωτερικών του χώρων. Το μέρος αυτό της δομής του κτιρίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως και τα υπόλοιπα, είτε για τη θέρμανση είτε για τον δροσισμό του.

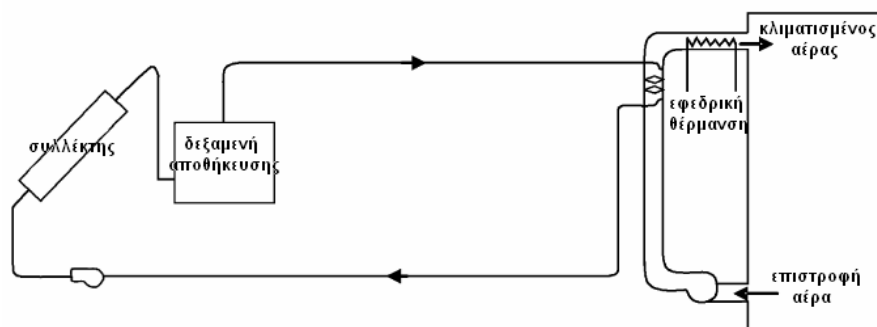
Σε κάθε περίπτωση, η λειτουργία των οροφών ως μέσων θέρμανσης ή ψύξης βασίζεται σε κάποιο βοηθητικό σύστημα. Στην πρώτη σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται η ηλιακή ακτινοβολία για την αποθήκευση λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας, ενώ κατά τη δεύτερη συνήθως διαθέτουν διάκενα που διατρέχονται από σωληνώσεις με ψυκτικό νερό. [44] [45]

#### 4.3.6 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα και νερού

Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για την χρήση ΥΑΦ σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης κτιρίων ήταν με την εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης με το άλας του Glauber. Τα πρώιμα πειράματα ολοκληρώθηκαν ανεπιτυχώς, καθώς δεν είχαν αναπτυχθεί ακόμη οι μέθοδοι που απέτρεπαν τη διάσπαση του άλατος.

Ένα χρήσιμο συμπέρασμα που προέκυψε από όλη αυτή την προσπάθεια ήταν ότι λόγω της μεγάλης θερμικής πυκνότητας του άλατος Glauber, και άλλων ΥΑΦ όπως παραφίνες που χρησιμοποιήθηκαν, ο όγκος αυτών των συστημάτων ήταν υποπολλαπλάσιος σε σχέση με αυτών συμβατικών συστημάτων όπως η κλίνη χαλικών ή η απλή δεξαμενή νερού. Άρα η χρήση τους, από άποψη οικονομίας χώρου άξιζε περεταίρω διερεύνηση.

Η θέρμανση κτιριακών εγκαταστάσεων με τη χρήση ηλιακών θερμαντήρων νερού παρουσιάζει επίσης αρκετό ενδιαφέρον, λόγω της σχετικά οικονομικής και εύκολης κατασκευής και εγκατάστασής τους. Η ενσωμάτωση ΥΑΦ σε τέτοια συστήματα βελτιώνει τις θερμικές ιδιότητες των συστημάτων, καθώς απορροφάται πολύ περισσότερη ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όποτε κριθεί απαραίτητο. [30]



Εικόνα 4.3.6.α Διάταξη ηλιακού συστήματος θέρμανσης με PCM [46]

#### 4.4 Άλλες Εφαρμογές

Εκτός από τις ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές των ΥΑΦ σε κτιριακές εγκαταστάσεις, υπάρχουν και άλλες που ξεφεύγουν από τα δομικά υλικά. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η χρήση ΥΑΦ μπορεί να επιφέρει μεγάλα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη σε διάφορες πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας.

##### 4.4.1 Ηλιακά Μαγειρικά Σκεύη

Ένας ανερχόμενος τρόπος προετοιμασίας του φαγητού σε χώρες με θερμό κλίμα και αρκετή ηλιοφάνεια είναι η χρήση ηλιακών μαγειρικών σκευών, κατά την ίδια λογική που χρησιμοποιούνται τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα και νερού. Η χρήση τους περιορίζεται όμως σημαντικά όταν η αποθηκευτικές τους δυνατότητες είναι μικρές, οπότε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τις ώρες που δεν επικρατεί αρκετή ηλιοφάνεια. [30]

Λύση σε αυτό το πρόβλημα φαίνεται ότι μπορεί να δώσει η ενσωμάτωση ΥΑΦ σε τέτοια σκεύη, με σκοπό της αύξησης της αποθηκευτικής του ικανότητας. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη βελτίωση αυτών των συστημάτων, έχει δειχθεί ότι η λανθάνουσα θερμότητα που μπορούν να αποδώσουν τα υλικά αλλαγής φάσης κατά τις απογευματινές ή και τις βραδινές ώρες είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί για το μαγείρεμα.

Λόγω της φύσης της εφαρμογής, απαιτούνται υλικά με αρκετά υψηλό σημείο τήξης, ανώτερο των 80 °C, ακόμη και 105 έως 110 °C και με υψηλή θερμότητα τήξης, τουλάχιστον 220 KJ/Kg.

##### 4.4.2 Ηλιακά Θερμοκήπια

Η λειτουργία των θερμοκηπίων βασίζεται στη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας από το περίβλημά τους, με σκοπό την ανάπτυξη φυτών που υπό κανονικές συνθήκες δε θα διέθεταν την απαραίτητη θερμότητα για να αναπτυχθούν.

Η εισαγωγή αποθηκευτικών μέσων ενέργειας με ΥΑΦ σε τέτοια θερμοκήπια, αυξάνει τα ποσά την διαθέσιμης ενέργειας, ενώ με κατάλληλες μεθόδους, αυτή μπορεί να αποθηκεύεται όταν βρίσκεται σε αφθονία και να αποδίδεται σε δυσμενείς καταστάσεις, όπως συννεφιά ή το απόγευμα. [30]

##### 4.4.3 Ιατρική

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τομέας των ιατρικών εφαρμογών. Πολλές φορές είναι απαραίτητη η ψύξη ή θέρμανση συγκεκριμένων μερών του σώματος. Συνήθης είναι η ψύξη με τη χρήση πάγου μετά από εγχειρήσεις ή ως πρώτη βοήθεια σε ατυχήματα, η οποία όμως ελλοχεύει τον κίνδυνο της τοπικής υποθερμίας. Αυτός ο κίνδυνος μπορεί να εξαιρεθεί με τη χρήση ΥΑΦ ως ψυκτικά μέσα, αφού το σημείο τήξης τους μπορεί να επιλέγει τέτοιο ώστε το υλικό να διαθέτει την απαραίτητη ψυκτική ικανότητα, αλλά να μην ξεπερνά κάποια επικίνδυνα όρια.

Θεραπευτικές μέθοδοι για την φροντίδα συμπτωμάτων υποξείας και χρόνιων ρευματικών παθήσεων χρησιμοποιούν θερμαντικά μέσα με ενσωματωμένα ΥΑΦ, ενώ συστήματα αποτροπής υποθερμίας όπως κουβέρτες και υπνόσακοι, μπορούν και αυτά να είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να αποθηκεύουν περισσότερη θερμότητα. [31]

#### 4.4.4 Λοιπές Εφαρμογές

Τα ΥΑΦ φαίνονται ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος βελτίωσης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Μπορούμε με ασφάλεια να πούμε ότι όπου υπάρχει η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας, τέτοια υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή αναζητούνται οι τρόποι με τους οποίους αυτό μπορεί να γίνει εφικτό. Πέρα από τις παραπάνω εφαρμογές που αναφέρθηκαν, επιγραμματικά επισημαίνονται και άλλες, έτσι ώστε να γίνει κατανοητό το μέγεθος του εύρους των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να απαντηθούν τα ΥΑΦ:

- Αποθήκευση ψύξης, φυσικός και τεχνητός πάγος [30]
- Ηλιακά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας [30]
- Υφάσματα για την ένδυση [31]
- Αυτοκινητοβιομηχανία [31]
- Μεταφορές, ψυχρές αλυσίδες μεταφοράς ευαίσθητων προϊόντων [47]
- Εστίαση, διατήρηση τροφίμων σε επιθυμητές θερμοκρασίες [47]
- Μεταφορά μεταμοσχευμάτων [47]
- Έλεγχος θερμοκρασίας κέντρων δεδομένων και διακομιστών (data centers and servers) [47]

# 5

## ΥΑΦ στην Τοιχοποιία – Μελέτες και αποτελέσματα

### 5.1 Γενικά

Οι εφαρμογές των PCM, όπως φαίνεται από το προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ποικίλες. Για τον κτιριακό τομέα ειδικότερα και την ενσωμάτωση των ΥΑΦ στα δομικά υλικά, διεξάγονται διαρκώς έρευνες και οι μελετητές δείχνουν ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αποθήκευσης ενέργειας μέσω της λανθάνουσας θερμότητας. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα τέτοιων συστημάτων να:

- Διευκολύνουν τη διαχείριση της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό, διότι η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί όταν είναι αναγκαία και έτσι να μειωθεί το χάσμα ανάμεσα στα ενεργειακά φορτία των κτιρίων κατά τις ώρες αιχμής και κατά τις ώρες με χαμηλή ζήτηση.
- Συμβάλλουν στη μείωση των λειτουργικών εξόδων. Στις περισσότερες χώρες, λόγω εποχικών ή άλλων συνθηκών, η τιμή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια και τους καταναλωτές γενικότερα παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, προτιμάται να καταναλώνεται λιγότερο ρεύμα κατά τις ώρες αιχμής, κάτι που μπορούν να επιτύχουν τα συστήματα αυτά. Επίσης, η ενέργεια που αποθηκεύεται σε αυτά αποδίδεται αργότερα, προσφέροντας έτσι ακόμη περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας.
- Βελτιώνουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης των κτιρίων. Με τη χρήση τέτοιων συστημάτων είναι δυνατή η αποθήκευση ενέργειας όταν αυτή βρίσκεται σε περίσσεια και να αποδοθεί ξανά στους χώρους του κτιρίου όταν αυτή δεν είναι πλέον διαθέσιμη στον ίδιο βαθμό ή και καθόλου. Καλύτερο παράδειγμα για αυτή την περίπτωση αποτελούν τα ηλιακά συστήματα, καθώς η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο όταν υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια.
- Τέλος, αυτό που παρουσιάζει ίσως και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη χώρα μας, είναι η μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά τους θερμούς μήνες του έτους. Ο κλιματισμός δηλαδή μπορεί να γίνει ευκολότερος και λιγότερο δαπανηρός, κάτι που είναι ιδιαίτερα ευεργετικό για τους κατοίκους, την οικονομία και το περιβάλλον. [30] [32]

## 5.2 Μελέτες στην Τοιχοποιία

Μία μελέτη σχετικά με την εφαρμογή των ΥΑΦ στην τοιχοποιία είναι αυτή των Biswas et al.[ref], κατά την οποία μελετήθηκε η χρήση ΥΑΦ χαμηλού κόστους ως μέσα αποθήκευσης ενέργειας του κτιριακού κελύφους. Η μελέτη αυτή, μετά από υπολογιστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε και η οποία σχετίζεται άμεσα με το υπολογιστικό μέρος της παρούσας, ότι η χρήση ΥΑΦ σε στρώματα της τοιχοποιίας μειώνει τελικά την ηλεκτρική κατανάλωση ενός υποθετικού συστήματος κλιματισμού για τον εσωτερικό αέρα. Επίσης, δείχθηκε ότι η τοποθέτησή στα τελευταία, εσωτερικά στρώματα αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα.

Στην μελέτη των Sharifi et al. γίνεται μελέτη χρήσης γυψοσανίδων με ΥΑΦ, όπως και στην παρούσα εργασία. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε εξετάζει τελικά αν μειώνονται τα εν δυνάμει ψυκτικά φορτία της τοιχοποιίας. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι η χρήση ΥΑΦ με αυτόν τον τρόπο, σε νέα κτίρια ή παλαιότερα ήδη υπάρχοντα, μπορεί να επιφέρει μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου.

Σε κάποιες παλαιότερες μελέτες, ήδη από τη δεκαετία του '90 όταν ξεκίνησε η συστηματική μελέτη των ΥΑΦ στις κτιριακές εφαρμογές, εξετάστηκε η συνδρομή τέτοιων υλικών σε υφιστάμενα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούν παθητικά ηλιακά συστήματα. Από μία από αυτές προέκυψε ότι η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας για μια περιοχή με τις μετεωρολογικές συνθήκες του Wisconsin είναι της τάξης των 3 GJ (15% επί του συνόλου), ενώ για μία περιοχή σαν αυτή του Helsinki είναι της τάξης των 2 GJ (6% επί του συνόλου). Αυτή η διαφορά δείχνει τη σημασία της ύπαρξης αρκετής ηλιοφάνειας για την καλύτερη απόδοση τέτοιων συστημάτων, αφού η μία πόλη βρίσκεται αρκετά πιο νότια σε σχέση με την άλλη.

Έρευνα έχει πραγματοποιηθεί όχι μόνο για την επίδραση των ΥΑΦ στην τοιχοποιία, αλλά και για άλλες πτυχές της εφαρμογής τους. Για παράδειγμα, η έρευνα των Banu et al. έδειξε ότι η χρήση ενός συγκεκριμένου ΥΑΦ έπρεπε να συνδυαστεί με την εφαρμογή επιβραδυντικών φλόγας, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι προδιαγραφές ασφαλείας ως προς την εκδήλωση πυρκαγιάς.

Γενικά, από την βιβλιογραφία που υπάρχει πλέον διαθέσιμη για τα ΥΑΦ στην τοιχοποιία και η οποία είναι αρκετά μεγάλη, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι οι κτιριακές εφαρμογές των ΥΑΦ μπορούν να είναι ευεργετικές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, αρκεί να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες και οι συνθήκες του κάθε προβλήματος.





## Υπολογιστικό Μέρος

# 6

### Παρουσίαση Λογισμικού Comsol Multiphysics®

Το Comsol Multiphysics® αποτελεί ένα σύγχρονο και περιεκτικό λογισμικό προσομοιώσεων με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Είναι αναπτυγμένο έτσι ώστε να προσφέρει στον χρήστη όσο το δυνατότερο καλύτερο έλεγχο των μοντέλων και των διεργασιών που απαιτούνται για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση διαφόρων διατάξεων. [48] [49]



*Εικόνα 6.α Το λογότυπο του Comsol Multiphysics® για την έκδοση 5.0.*

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, στο εργαστήριο της Σχολής ήταν διαθέσιμη η έκδοση 5.2a.

Ο σχεδιασμός των μοντέλων μπορεί να γίνει σε όλες τις διαστάσεις, από μηδέν, για υπολογιστικά μαθηματικά μοντέλα και έως τρεις, για φυσικά μοντέλα. Μερικοί από τους τομείς των φυσικών επιστημών που καλύπτει το λογισμικό αυτό είναι η μηχανική των ρευστών, η μεταφορά θερμότητας, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η χημική μηχανική και η ακουστική. Με τον όρο Multiphysics, νοείται η δυνατότητα που παρέχει το λογισμικό να συνδυάζονται πολλαπλές φυσικές θεωρίες, δημιουργώντας έτσι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο το οποίο επιτρέπει την αποφυγή αρκετών παραδοχών. Αυτό είναι άλλωστε που επιδιώκουν συνήθως οι ερευνητές και οι επιστήμονες, καθώς παράγονται πιο ασφαλή και ακριβή αποτελέσματα για το αντικείμενο μελέτης τους. [48]

# 7

## Παρουσίαση Τοιχοποιίας – Πιλοτική Κατοικία Αμφιλοχίας

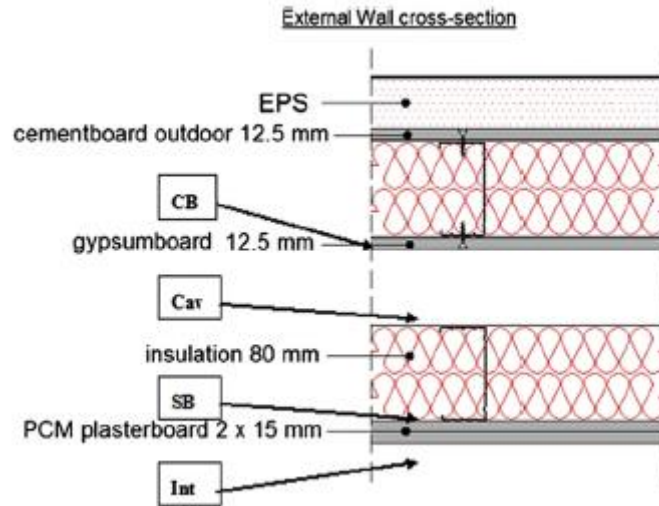
Ως σημείο αναφοράς για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η δομή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά μίας υπάρχουσας τοιχοποιίας, για την οποία έχουν ξαναγίνει μελέτες από το Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων & Συστημάτων Καύσης Ε.Μ.Π. κατά το παρελθόν. Αυτή η τοιχοποιία, είναι μέρος μίας πιλοτικής κατοικίας που κατασκευάστηκε στην Αμφιλοχία το 2011. Πρόκειται για μία τυπική οικογενειακή μεζονέτα δύο ορόφων η οποία κατασκευάστηκε με τη χρήση ξηρών δομικών υλικών και χαλύβδινου σκελετού για τη στήριξή τους. [50]



*Εικόνα 7.α Η εξωτερική όψη της πιλοτικής κατοικίας στην Αμφιλοχία*

Οι εξωτερικοί τοίχοι της οικίας, οι οποίοι είναι αυτοί που μελετώνται, είναι πολυστρωματικοί. Εξωτερικά προς εσωτερικά, αποτελούνται από ένα στρώμα πάχους 50 mm μόνωσης EPS 80, ένα στρώμα πάχους 12,5 mm το οποίο αποτελείται από μία τσιμεντοσανίδα (Knauf Aquarpanel® [51]), ένα στρώμα πάχους 80 mm μόνωσης πετροβάμβακα (Rockwool), ένα στρώμα πάχους 12,5 mm το οποίο αποτελείται από μία γυψοσανίδα (Knauf GKB® [51]), ένα διάκενο αέρα πάχους 300 mm για το χαλύβδινο πλαίσιο στήριξης και τις σωληνώσεις του κτιρίου, άλλο ένα στρώμα πάχους 80 mm μόνωσης πετροβάμβακα και τέλος, από ένα στρώμα πάχους 30 mm το οποίο αποτελείται από δύο γυψοσανίδες ΥΑΦ (Knauf Smartboard® [51]).

Για τις γυψοσανίδες ΥΑΦ του τελευταίου αυτού στρώματος, έγινε υπολογισμός του εύρους ενεργοποίησης του ΥΑΦ τους στους 16° με 26° C, μέσω της μεθόδου της Διαφορικής Σάρωσης-Θερμιδομετρίας (DSC). Δηλαδή, εντός αυτών των ορίων θερμοκρασίας αναμένεται να συντελούνται τα φαινόμενα αλλαγής φάσης και επίσης, μετρήθηκε ότι το εγκατεστημένο ΥΑΦ αναμένεται να παρουσιάζει μέγιστη δραστηριότητα στους 24° C.



Εικόνα 7.β Απεικόνιση της διατομής της πολυστρωματικής τοιχοποιίας της Αμφιλοχίας.  
[50]

# 8

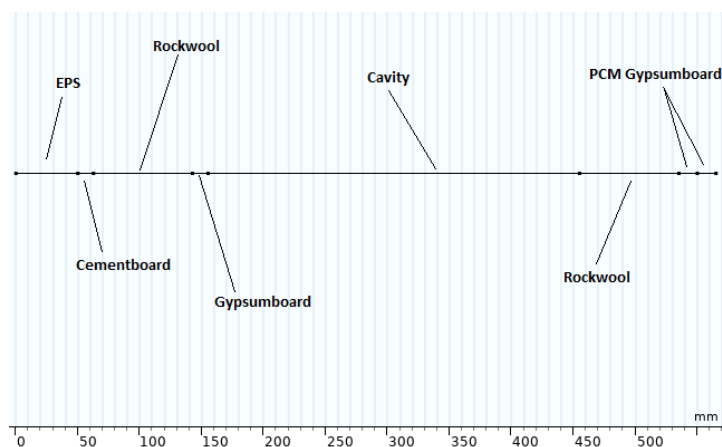
## Παρουσίαση Υπολ. Μοντέλου Πιστοποίησης – Σύγκριση με Πειραματικά Δεδομένα

Προκειμένου να πιστοποιηθούν τα αποτελέσματα που εξάγονται από το υπολογιστικό πρόγραμμα, δημιουργήθηκε το μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα. Τα πειραματικά δεδομένα που υπήρχαν διαθέσιμα [50] [52], περιλαμβάνουν μετρήσεις της θερμοκρασίας για διάφορα στρώματα της τοιχοποιίας της πιλοτικής κατοικίας στην Αμφιλοχία, όπως αυτά του εξωτερικού και του εσωτερικού τοιχώματος, καθώς επίσης και της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα. Το χρονικό βήμα των μετρήσεων ήταν 10 λεπτά (600 s) και έγιναν μετρήσεις για ένα ολόκληρο έτος.

### 8.1 Παρουσίαση Υπολογιστικού Μοντέλου Πιστοποίησης (1-d)

#### 8.1.1 Η Γεωμετρία του Μοντέλου

Η δομή του μοντέλου της τοιχοποιίας είναι μία μοντελοποίηση ουσιαστικά της τοιχοποιίας της πιλοτικής κατοικίας της Αμφιλοχίας. Διατηρούνται ίδια όλα τα πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας καθώς και η αλληλουχία τους, αλλά αποδίδονται ως ένα μονοδιάστατο μοντέλο, με το πάχος του κάθε στρώματος να ορίζει δύο σημεία πάνω σε έναν οριζόντιο άξονα. Τα σημεία αυτά αποτελούν την αρχή και το τέλος του εκάστοτε στρώματος.



Εικόνα 8.1.1α Το πλήρες μονοδιάστατο μοντέλο της τοιχοποιίας.

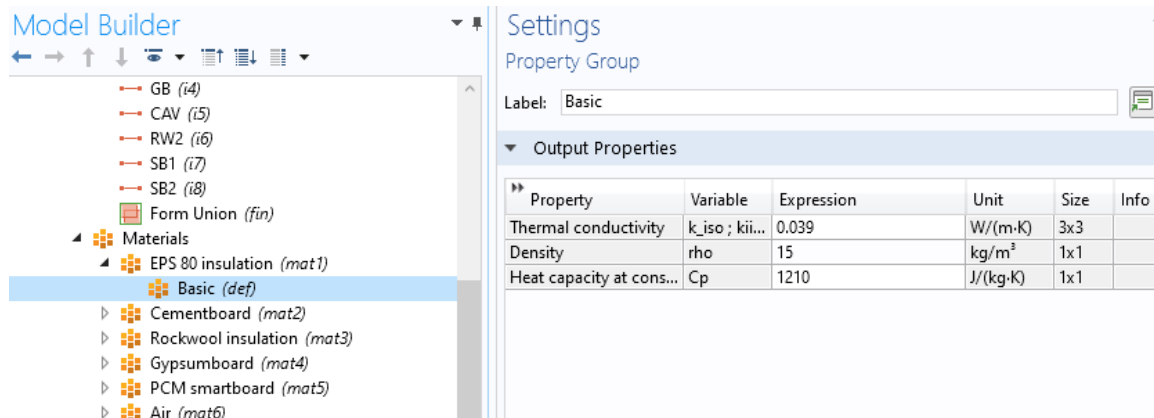
### 8.1.2 Φυσικές και Θερμικές Ιδιότητες Υλικών

Παρακάτω συνοψίζονται σε πινακοποιημένη μορφή τα μεγέθη των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που αποτελούν τη συγκεκριμένη τοιχοποιία. [50]

Υλικά Τοιχοποιίας Αμφιλοχίας				
Στρώμα	Πάχος d [mm]	Πυκνότητα $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Θερμοαγωγιμότητα $\lambda$ [W/m/K]	Θερμοχωρητικότητα Cp [Kj/kg/K]
Μόνωση EPS 80	50	15	0,039	1,21
Τσιμεντοσανίδα (Cementboard)	12,5	1280	0,35	0,879
Μόνωση Rockwool	80	50	0,035	0,9
Γυψοσανίδα (Plasterboard)	12,5	712	0,21	0,96
Γυψοσανίδα ΥΑΦ	30	787	0,27	1,4 (εκτός εύρους αλλαγής φάσης)

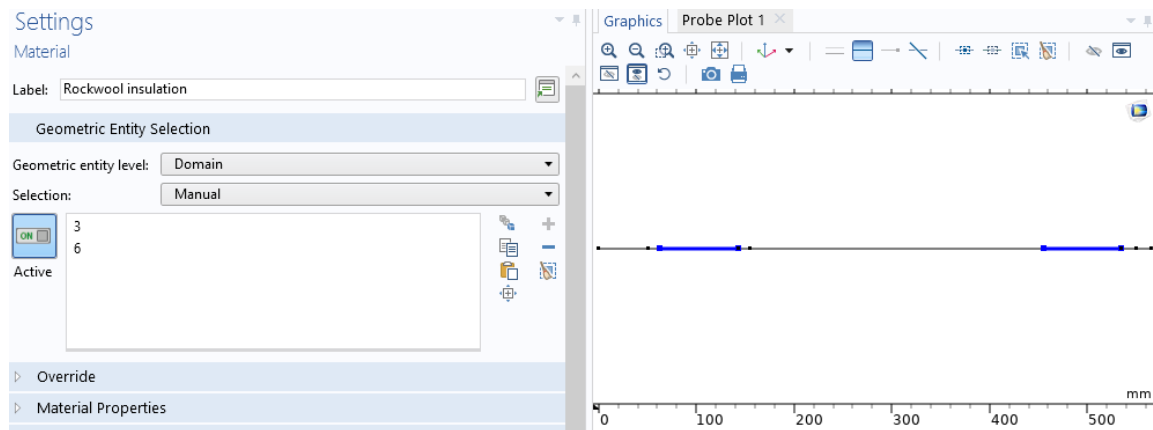
Πίνακας 8.1.2 Θερμικές – Φυσικές ιδιότητες υλικών τοιχοποιίας

Αυτά τα μεγέθη ορίζονται στο Comsol® ως χαρακτηριστικά των υλικών που επιλέγονται για το κάθε στρώμα της γεωμετρίας. Επειδή τα υλικά αυτά είναι εμπορικά και έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες, δημιουργούνται νέα υλικά για το μοντέλο στα οποία ορίζονται εξ αρχής συγκεκριμένες φυσικές και θερμικές ιδιότητες. Εξαίρεση αποτελεί ο αέρας του διακένου της τοιχοποιίας, ο οποίος βρίσκεται εύκαιρος στη βιβλιοθήκη των υλικών του προγράμματος και ήταν έτοιμος προς χρήση.



Εικόνα 8.1.2α Παράδειγμα ορισμού ιδιοτήτων για ένα υλικό του μοντέλου, εδώ της μόνωσης EPS 80

Για το κάθε υλικό από τα παραπάνω έγινε αντιστοιχία με μία ή περισσότερες περιοχές της γεωμετρίας του μοντέλου, έτσι ώστε να αποτυπωθεί με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια η τοιχοποιία. Αυτές οι περιοχές της γεωμετρίας, οκτώ (8) στο σύνολο, αντιστοιχούν η κάθε μία σε ένα στρώμα της εξεταζόμενης τοιχοποιίας.

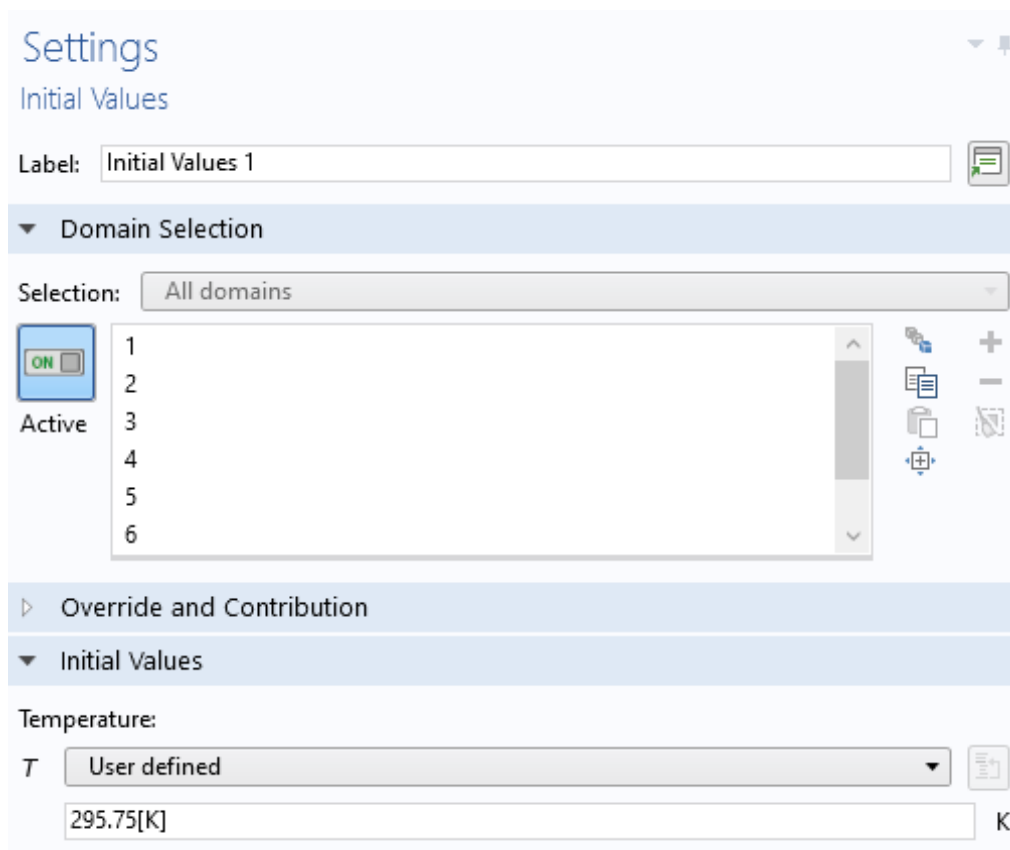


*Εικόνα 8.1.2β Παράδειγμα αντιστοιχίας του πετροβάμβακα στις περιοχές (domains) 3 και 6 του γεωμετρικού μοντέλου.*

### 8.1.3 Αρχικές Συνθήκες

Ως φυσική του προβλήματος, επιλέχθηκε κατά την δημιουργία του μοντέλου η Μεταφορά Θερμότητας σε Στερεά (Heat Transfer in Solids), αφού αυτό που μας αφορά είναι η παρακολούθηση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της τοιχοποιίας και η έκβασή τους.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα η μοναδική αρχική συνθήκη που μας αφορά είναι αυτή της θερμοκρασίας. Αυτή που επιλέχθηκε για το σύνολο του μοντέλου είναι οι 22,6 °C (295,75 K). Η τιμή αυτή επιλέχθηκε από τα πειραματικά δεδομένα, και είναι η τιμή της θερμοκρασίας του εσωτερικού τοιχώματος κατά την πρώτη μέτρηση για τον μήνα Ιούνιο. Αυτή η τιμή έχει ελάχιστη σημασία πάντως, καθώς αποτελεί απλά μια τιμή για την έναρξη των υπολογισμών. Οι υπολογισμοί, όπως θα φανεί παρακάτω, είναι για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, οπότε σύντομα η αρχική τιμή δεν φέρει καμία επίδραση στις τιμές των αποτελεσμάτων.

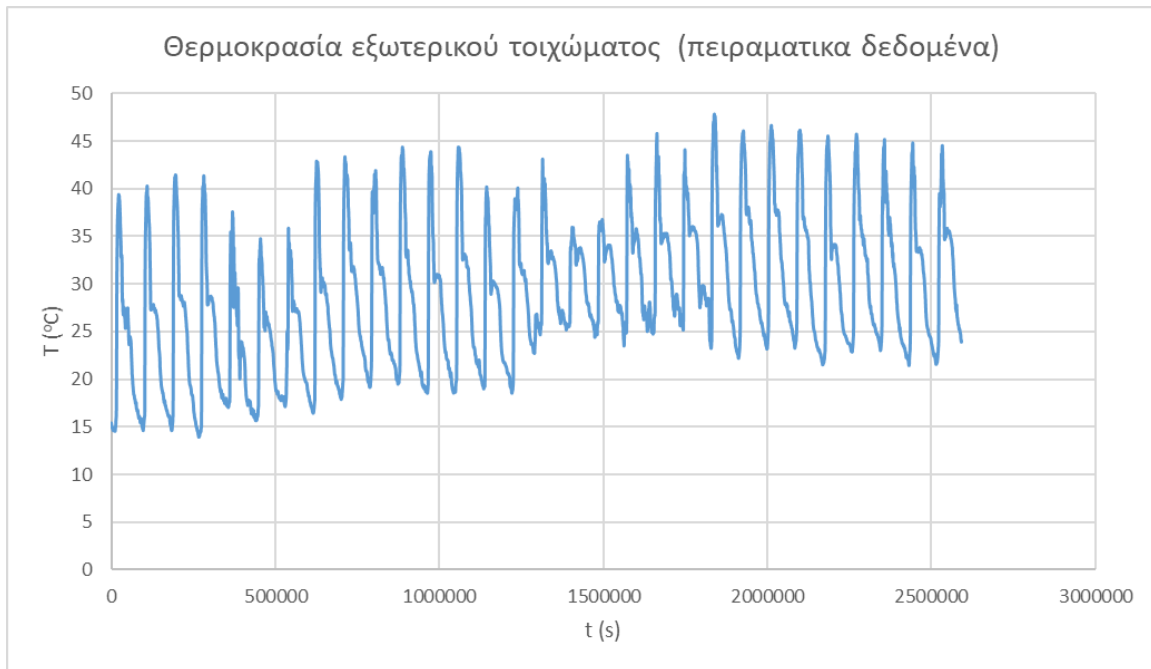


Εικόνα 8.1.3α Αρχική τιμή θερμοκρασίας μοντέλου πιστοποίησης



#### 8.1.4 Εξωτερική Οριακή Συνθήκη – Θερμοκρασία Εξωτερικού Τοιχώματος

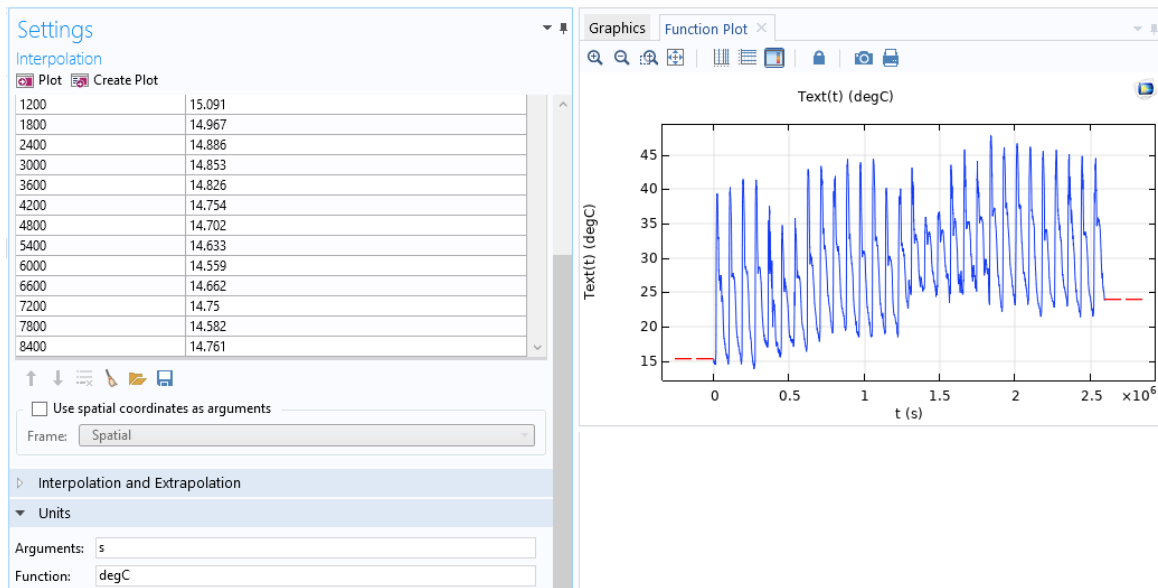
Το πρώτο σημείο του μοντέλου αποτελεί σημείο της επιφάνειας του εξωτερικού τοιχώματος. Από τα πειραματικά δεδομένα της πιλοτικής κατοικίας υπήρχε διαθέσιμη η θερμοκρασία αυτή, σε πινακοποιημένη μορφή με χρονικό βήμα 10 λεπτών. Επειδή στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της επίδρασης του ΥΑΦ στα θερμικά φορτία της οικίας, επιλέχθηκε ως χρονική περίοδος των υπολογισμών ο μήνας Ιούνιος. Κατά αυτόν τον μήνα η θερμοκρασία αναμένεται να πάρει τιμές μεταξύ 19 και 26 °C, δηλαδή εντός της περιοχής λειτουργίας του ΥΑΦ. Πράγματι η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας αποτυπώνει αυτό ακριβώς.



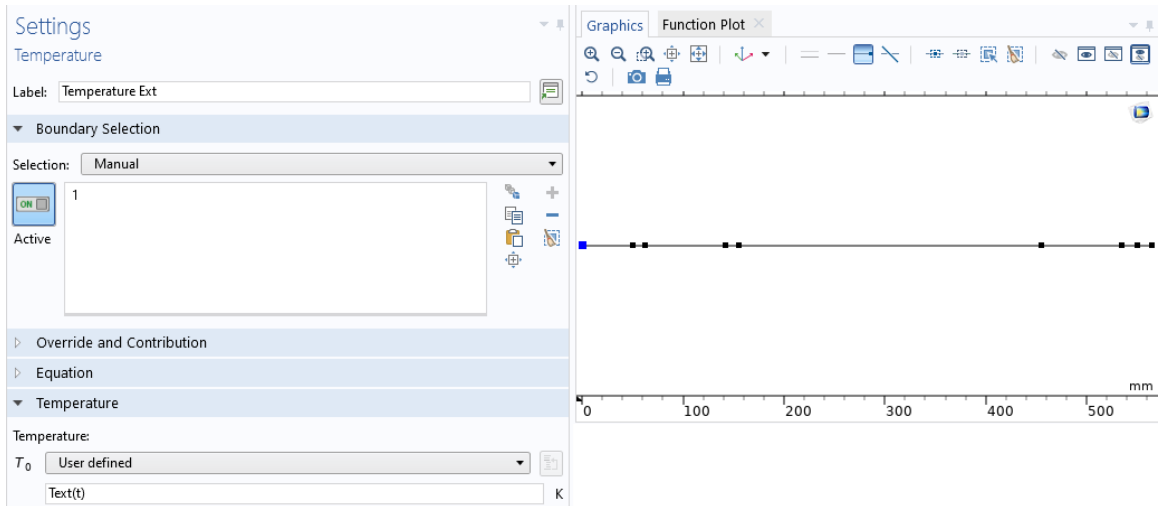
Εικόνα 8.1.4α Γραφική παράσταση θερμοκρασίας εξωτερικού τοιχώματος (Ιούνιος)

Για τα παραπάνω δεδομένα, δημιουργήθηκε κατάλληλο αρχείο το οποίο εισήχθη στο υπολογιστικό μοντέλο ως η χρονικά εξαρτημένη θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος.

Το μοντέλο ουσιαστικά χρησιμοποιεί την θερμοκρασία αυτή, ανάλογα με την τιμή του χρονικού βήματος των υπολογισμών, και αποδίδει την απόκριση του συστήματος σε αυτή, δηλαδή την θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος.



Εικόνα 8.1.4β Εισαγωγή θερμοκρασίας εξωτερικού τοιχώματος ως συνάρτηση του χρόνου

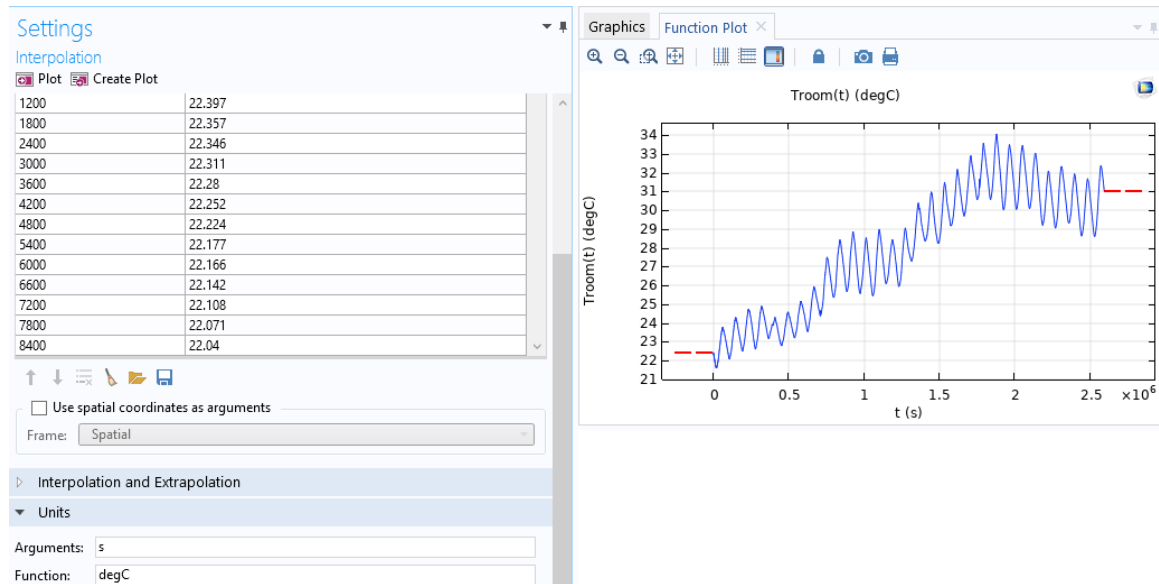


Εικόνα 8.1.4γ Ορισμός οριακής συνθήκης θερμοκρασίας για το εξωτερικό τοίχωμα

### 8.1.5 Εσωτερική Οριακή Συνθήκη – Ροή Θερμότητας Εσωτερικού Τοιχώματος

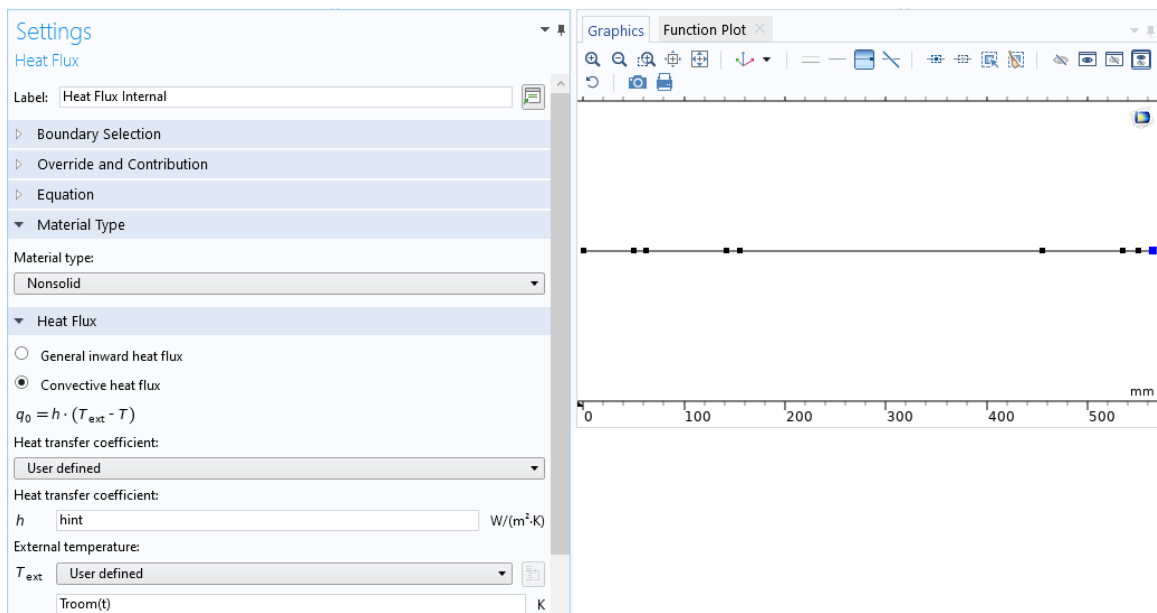
Το τελευταίο σημείο της τοιχοποιίας είναι σημείο της εσωτερικής επιφάνειας του τοιχώματος, δηλαδή της επιφάνειας του τοιχώματος που έρχεται σε επαφή και συναλλάσσει θερμότητα μέσω συναγωγής με τον αέρα στο εσωτερικό της οικίας.

Από τα πειραματικά δεδομένα, διαθέσιμη υπήρχε η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα. Ομοίως με την παραπάνω διαδικασία για την εξωτερική θερμοκρασία του τοιχώματος, εισήχθη στο υπολογιστικό πρόγραμμα και ορίστηκε οριακή συνθήκη ροής θερμότητας για το εσωτερικό τοίχωμα (heat flux internal).



*Εικόνα 8.1.5α Η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα  $T_{room}$  (Ιούνιος) από τα πειραματικά δεδομένα*

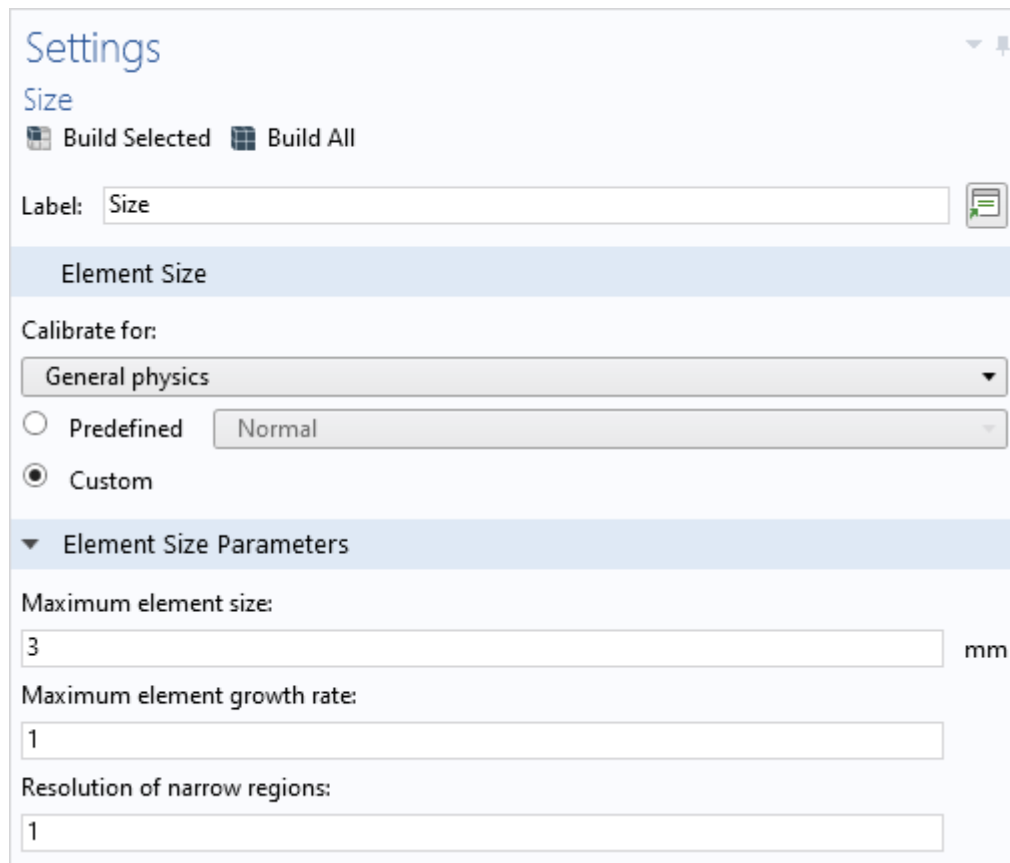
Για το σύστημα, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ( $T_{room}$ ) θεωρείται ως η εξωτερική για την εξίσωση της θερμότητας, ενώ εσωτερική είναι η υπολογιζόμενη θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος ( $T$ ). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_{int}$  ορίστηκε ίσος με  $7.69 \text{ W/m}^2/\text{K}$  από τυπικές τιμές για εσωτερικό τοίχωμα. [53]



Εικόνα 8.1.5b Ορισμός εσωτερικής οριακής συνθήκης

#### 8.1.6 Υπολογιστικό Πλέγμα

Για την ανεξαρτησία του πλέγματος, πραγματοποιήθηκαν αρχικά προσομοιώσεις με ολοένα και πιο πυκνό πλέγμα, οι οποίες όμως παρείχαν ουσιαστικά τα ίδια αποτελέσματα. Τελικά, για την πυκνότητα του πλέγματος ορίστηκε απόσταση 3 mm μεταξύ των κόμβων, ενώ παράλληλα ορίστηκε αυτή η απόσταση να παραμένει οπωσδήποτε σταθερή θέτοντας τιμή 1 για τον μέγιστο ρυθμό αύξησης των στοιχείων (maximum element growth rate). Αυτή η σταθερή απόσταση μεταξύ των κόμβων του πλέγματος, αποδίδει αρκετούς υπολογιστικούς κόμβους εντός των λεπτών στρωμάτων που αποτελούν τις γυψοσανίδες με ΥΑΦ, έτσι ώστε να λαμβάνονται πιο ακριβή αποτελέσματα.



Settings

Size

☒ Build Selected ☐ Build All

Label:

Element Size

Calibrate for:

☐ Predefined

☒ Custom

▼ Element Size Parameters

Maximum element size:

mm

Maximum element growth rate:

Resolution of narrow regions:

Εικόνα 8.1.6α Ορισμός παραμέτρων για το υπολογιστικό πλέγμα.

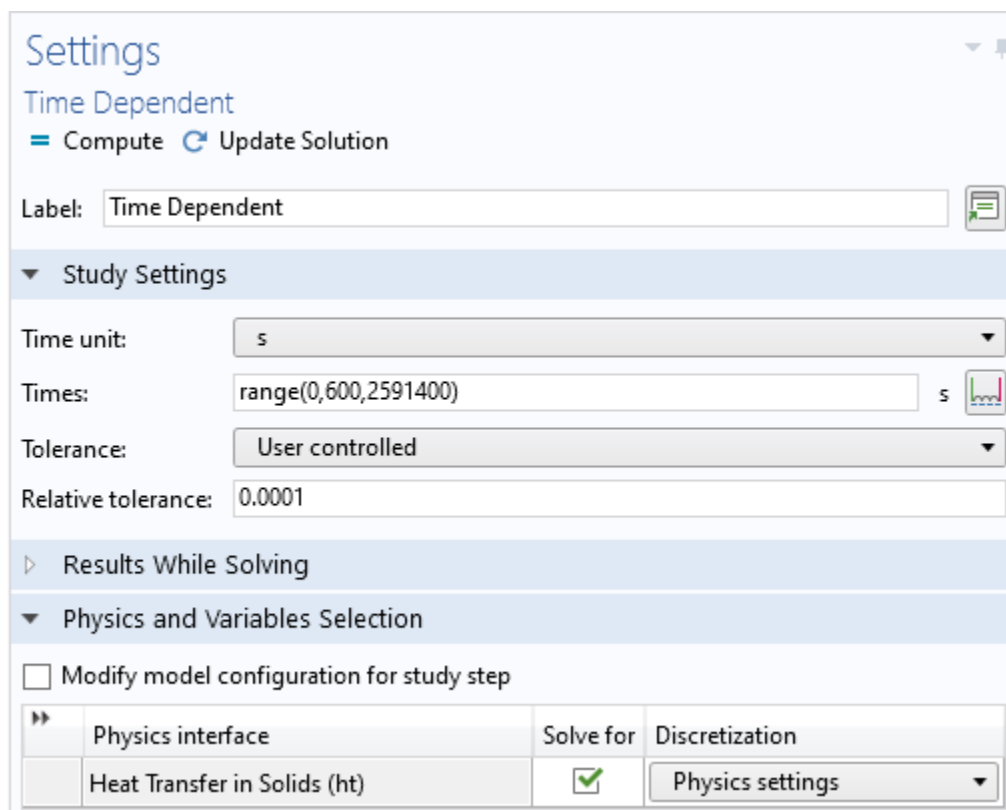
Από τα παραπάνω προκύπτει ένα υπολογιστικό πλέγμα 189 υπολογιστικών κόμβων.

### 8.1.7 Υπολογιστικός Χρόνος – Επιλύτης

Το πρόβλημα από τη φύση του εξαρτάται από τον χρόνο, οπότε για την υπολογιστική διαδικασία πρέπει να γίνει η επιλογή ενός χρονικού βήματος για τους υπολογισμούς και ένα χρονικό σημείο για την ολοκλήρωσή τους.

Επειδή τα πειραματικά δεδομένα είχαν χρονικό βήμα 10 λεπτών (600 s), κρίθηκε προτιμότερη η επιλογή ίδιου χρονικού βήματος για τους υπολογισμούς. Έγιναν υπολογισμοί και με μικρότερο χρονικό βήμα, αλλά δεν παρείχαν κάποια ποιοτική βελτίωση των αποτελεσμάτων, ενώ πιο μικρό βήμα συνεπάγεται αντίστοιχα μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, ο οποίος μπορεί να γίνει δύσχρηστος κατά την επεξεργασία του.

Η χρονική περίοδος των υπολογισμών εξαρτάται από την περίοδο για την οποία απαιτείται η εξαγωγή συμπερασμάτων. Αφού στόχος του παρόντος ήταν ο προσδιορισμός ψυκτικών φορτίων, επιλέχθηκε ως χρονική περίοδος των υπολογισμών ολόκληρος ο μήνας Ιούνιος, όπου και αναμένεται η ενεργοποίηση, και επομένως μεγαλύτερη επίδραση της χρήσης ΥΑΦ.

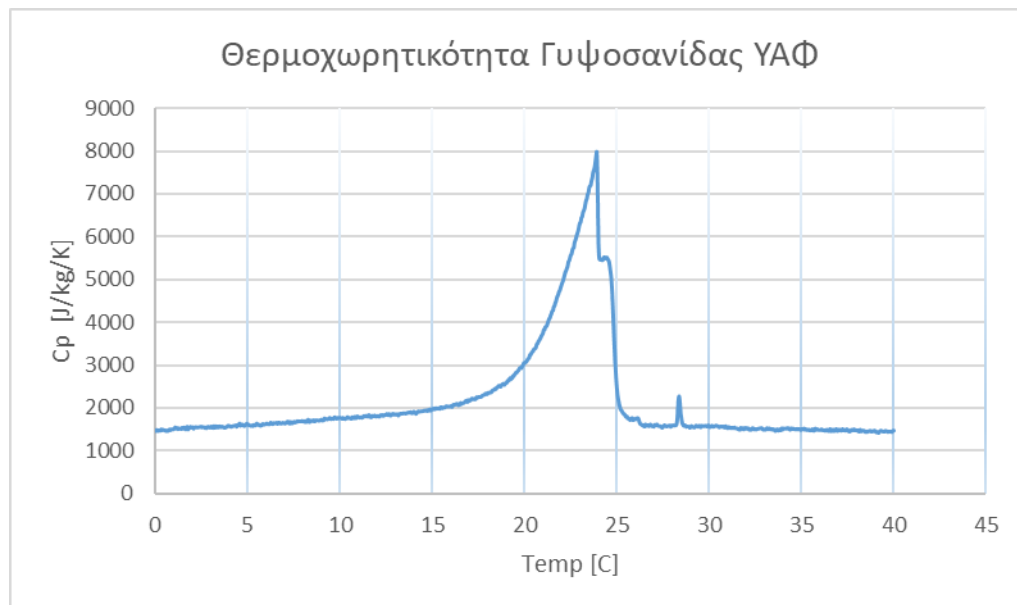


Εικόνα 8.1.7α Ορισμός παραμέτρων επιλύτη

### 8.1.8 Η Θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ

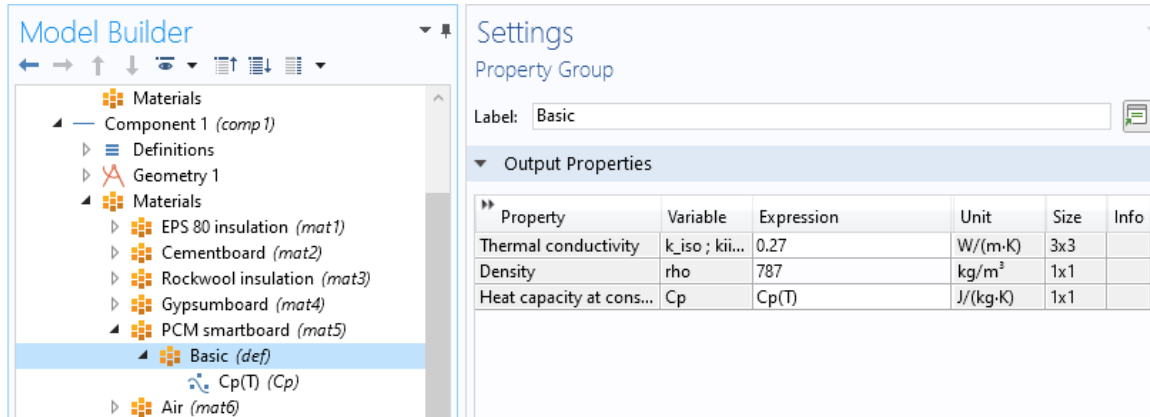
Σε αυτήν την ενότητα κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο εντάχθηκε το ΥΑΦ στο υπολογιστικό μοντέλο. Η ύπαρξη ΥΑΦ στο σύστημα επηρεάζει την απόκρισή του στην εξωτερική διέγερση που έχει οριστεί με την οριακή συνθήκη της εξωτερικής ροής θερμότητας. Αυτό διότι, όπως αναλύεται στο πρώτο θεωρητικό μέρος, τα ΥΑΦ αποτελούν μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την εξέταση της θερμοχωρητικότητάς τους στην περιοχή των θερμοκρασιών στις οποίες λαμβάνει χώρα η αλλαγή της φάσης τους.

Για το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ίδια με την εργασία των Mandilaras et al. [50] για την πιλοτική κατοικία της Αμφιλοχίας. Για τις ανάγκες αυτής της έρευνας μετρήθηκε μέσω πειραμάτων στο εργαστήριο η θερμοχωρητικότητα των γυψοσανίδων με ΥΑΦ. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν ότι πρόκειται για ένα υλικό του οποίου η θερμοχωρητικότητα αυξάνεται όταν αυτό θερμαίνεται πάνω από τους 16 °C, παρουσιάζει μέγιστο στους 24 °C τα 8000 J/kg/K, μετά το οποίο μειώνεται μέχρι τους 26 °C όπου και σταθεροποιείται. Η σταθερή τιμή της θερμοχωρητικότητας, δηλαδή αυτή εκτός των ορίων της θερμοκρασίας εντός των οποίων συντελούνται τα φαινόμενα αλλαγής φάσης, υπολογίστηκε ίση με 1400 J/kg/K.



Γράφημα 8.1.8α Η θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας ΥΑΦ (PCM smartboard της Knauf®) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για να ενταχθεί αυτή η πληροφορία στο σύστημα, η θερμοχωρητικότητα της γυψοσανίδας ΥΑΦ ορίζεται ως μία συνάρτηση  $C_p(T)$ , η οποία αποτελεί μία παρεμβολή που πραγματοποιεί το πρόγραμμα, αφού εισαχθούν σε αυτό τα πινακοποιημένα δεδομένα από τις μετρήσεις του εργαστηρίου.

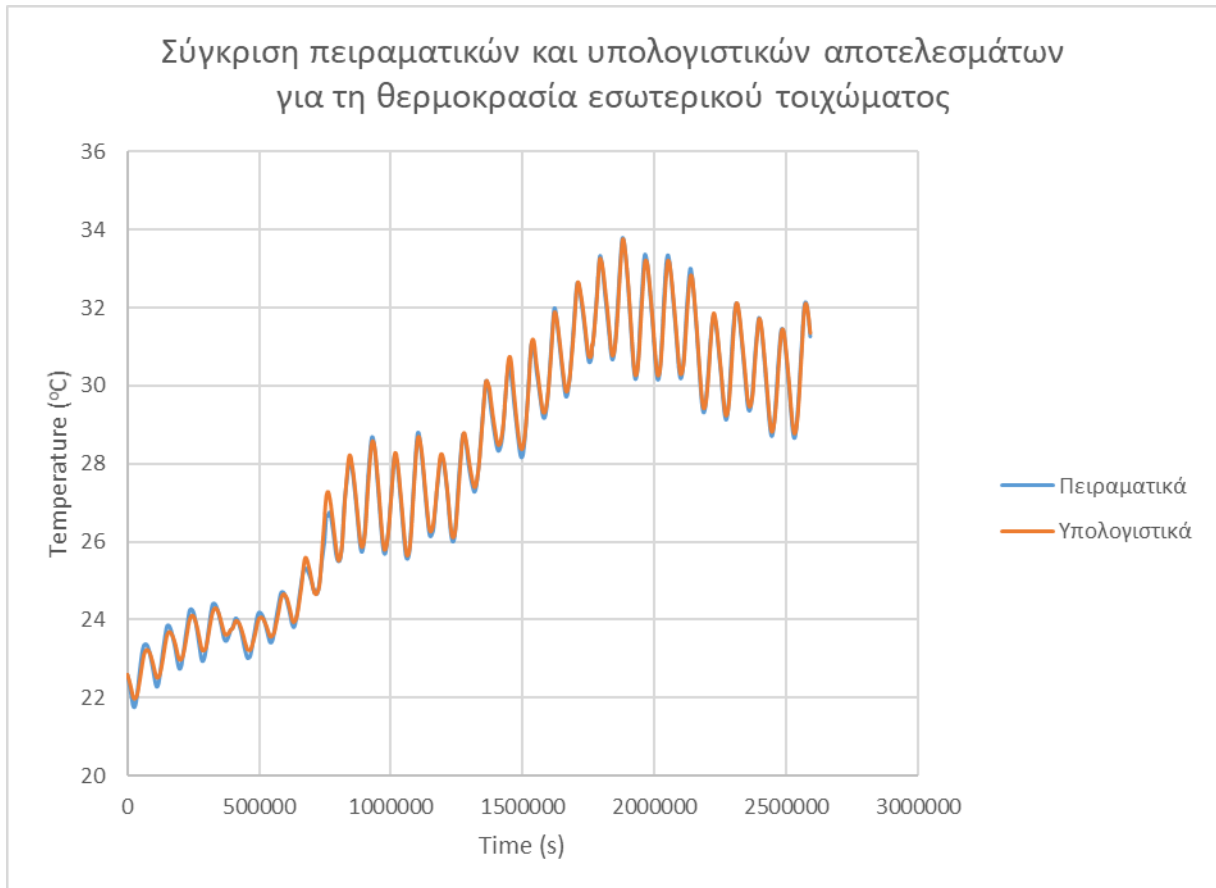


Εικόνα 8.1.8α Ορισμός της θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας ΥΑΦ ως συνάρτηση  $C_p(T)$



## 8.2 Σύγκριση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων με Πειραματικά Δεδομένα

Αφού δημιουργήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο, έγιναν οι υπολογισμοί και προέκυψαν υπολογιστικά αποτελέσματα για τη θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος για τον μήνα Ιούνιο. Αυτά συγκρίνονται παρακάτω με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα:



Γράφημα 8.2α Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων

Εποπτικά και μόνο από το γράφημα, φαίνεται ότι πειραματικά και υπολογιστικά δεδομένα βρίσκονται σε σχεδόν πλήρη ταύτιση, κάτι που συνεπάγεται την επιθυμητή πιστοποίηση του μοντέλου.

Για λόγους πληρότητας υπολογίστηκε σε υπολογιστικά φύλλα Excel® ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination)  $R^2$ . Ο συντελεστής αυτός αποτελεί ένδειξη της αξιοπιστίας των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αν αυτός λάβει την τιμή της μονάδας, τότε το μοντέλο κρίνεται τέλειο, ενώ αν λάβει τιμή μηδέν, τότε δεν υπάρχει καμία συνάφεια μεταξύ πειράματος και υπολογισμών. Τιμές άνω του 0,97 κρίνονται πολύ ικανοποιητικές και η τιμή του προκύπτει από τον τύπο: [54]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (T_i - t_i)^2}{\sum (T_i - T_{avg})^2}$$

Όπου:

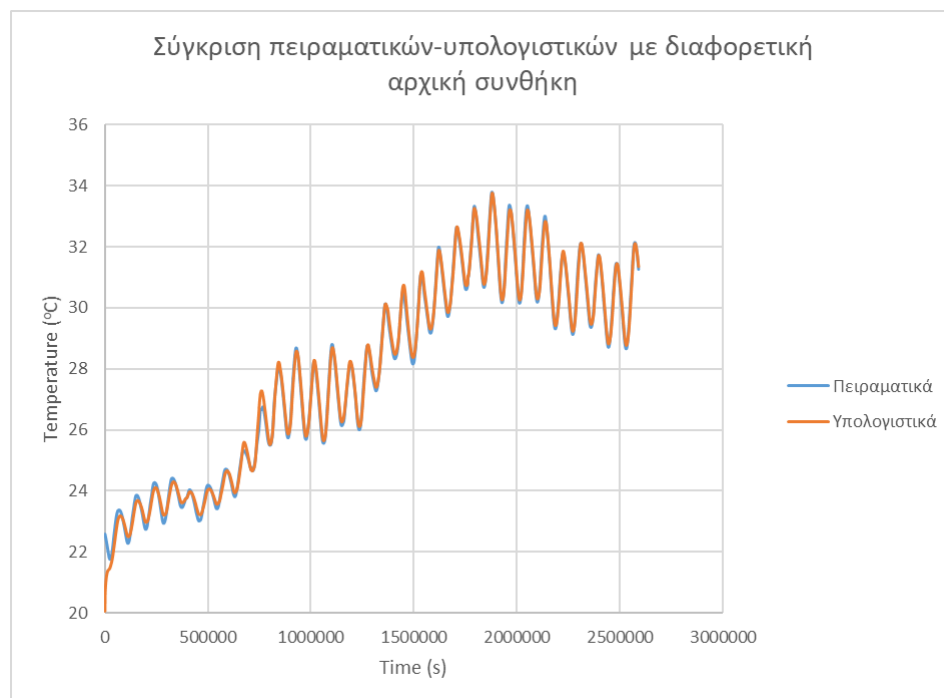
$T_i$ , η θερμοκρασία για κάθε χρονικό βήμα από τα πειραματικά δεδομένα

$t_i$ , η θερμοκρασία για κάθε χρονικό βήμα από τα υπολογιστικά δεδομένα

$T_{avg}$ , η μέση θερμοκρασία των πειραματικών δεδομένα

Από τα παραπάνω προέκυψε συντελεστής προσδιορισμού για το μοντέλο  $R^2=0,997$ , κάτι που επαληθεύει το συμπέρασμα από το γράφημα της σύγκρισης των δεδομένων.

Παρατίθεται επίσης το γράφημα της σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων με υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο η αρχική συνθήκη της θερμοκρασίας έχει οριστεί στους 20 °C, αντί για 22,6 °C που ορίστηκε για το μοντέλο της πιστοποίησης.



Γράφημα 8.2β Σύγκριση πειραματικών-υπολογιστικών με διαφορετική αρχική συνθήκη

Όπως φαίνεται από αυτό το γράφημα, οι τιμές που προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο “εξαναγκάζονται” να πάρουν αρχικά τιμές αρκετά διαφορετικές από τις πειραματικές. Πολύ σύντομα όμως τείνουν να τις πλησιάσουν και αφού γίνει αυτό δεν παρουσιάζουν κάποια ουσιαστική διαφορά σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από το μοντέλο της πιστοποίησης.

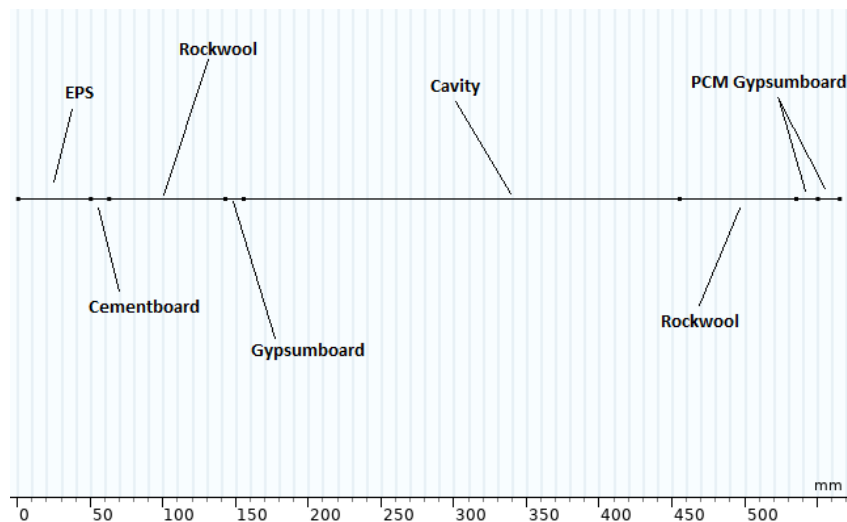
# 9

## Παρουσίαση Υπολ. Μοντέλου Τοιχοποιίας για την Περίοδο Ψυκτικών Φορτίων

Για την μελέτη της επίδρασης του ΥΑΦ στην τοιχοποιία και την εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων που καθιστούν αποδοτικότερη την εφαρμογή τέτοιων υλικών στα κτίρια, δημιουργήθηκε μονοδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο στο πρόγραμμα Comsol®. Το μοντέλο αυτό είναι ως επί το πλείστον ίδιο με το μοντέλο της πιστοποίησης. Διαφοροποίηση παρουσιάζεται στις οριακές συνθήκες του υπολογιστικού μοντέλου, καθώς πλέον δεν πιστοποιούνται υπάρχοντα υπολογιστικά δεδομένα, αλλά γίνεται παραμετρική μελέτη της απόκρισης της τοιχοποιίας σε διάφορες συνθήκες.

### 9.1 Η Γεωμετρία του Μοντέλου

Η γεωμετρία παραμένει η ίδια και βασίζεται σε αυτή της τοιχοποιίας της πιλοτικής κατοικίας της Αμφιλοχίας.



Εικόνα 9.1.α Το πλήρες μονοδιάστατο μοντέλο της τοιχοποιίας.

### 9.2 Φυσικές και Θερμικές Ιδιότητες Υλικών.

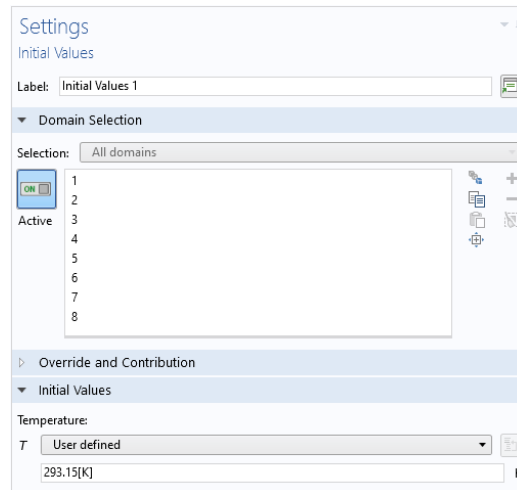
Παρακάτω παρουσιάζονται πάλι τα μεγέθη των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που αποτελούν τη συγκεκριμένη τοιχοποιία, τα οποία παραμένουν αμετάβλητα. [50]

Υλικά Τοιχοποιίας Αμφιλοχίας				
Στρώμα	Πάχος d [mm]	Πυκνότητα $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Θερμοαγωγιμότητα $\lambda$ [W/m/K]	Θερμοχωρητικότητα $C_p$ [Kj/kg/K]
Μόνωση EPS 80	50	15	0,039	1,21
Τσιμεντοσανίδα (Cementboard)	12,5	1280	0,35	0,879
Μόνωση Rockwool	80	50	0,035	0,9
Γυψοσανίδα (Plasterboard)	12,5	712	0,21	0,96
Γυψοσανίδα ΥΑΦ	30	787	0,27	1,4 (εκτός εύρους αλλαγής φάσης)

Πίνακας 9.2.α Θερμικές – Φυσικές ιδιότητες υλικών τοιχοποιίας

### 9.3 Αρχική Συνθήκη

Η αρχική συνθήκη που αφορά το παρόν είναι αυτή της θερμοκρασίας. Αυτή που επιλέχθηκε για το σύνολο του μοντέλου είναι οι 20 °C (293,15 K), καθώς είναι μια τυπική τιμή εντός του εύρους θερμοκρασιών που μπορεί να έχει το περιβάλλον και η τοιχοποιία. Αυτή η τιμή έχει ελάχιστη σημασία πάντως, καθώς αποτελεί απλά μια τιμή για την έναρξη των υπολογισμών. Οι υπολογισμοί, όπως θα φανεί παρακάτω, είναι για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, οπότε σύντομα η αρχική τιμή δεν φέρει καμία επίδραση στις τιμές των αποτελεσμάτων.

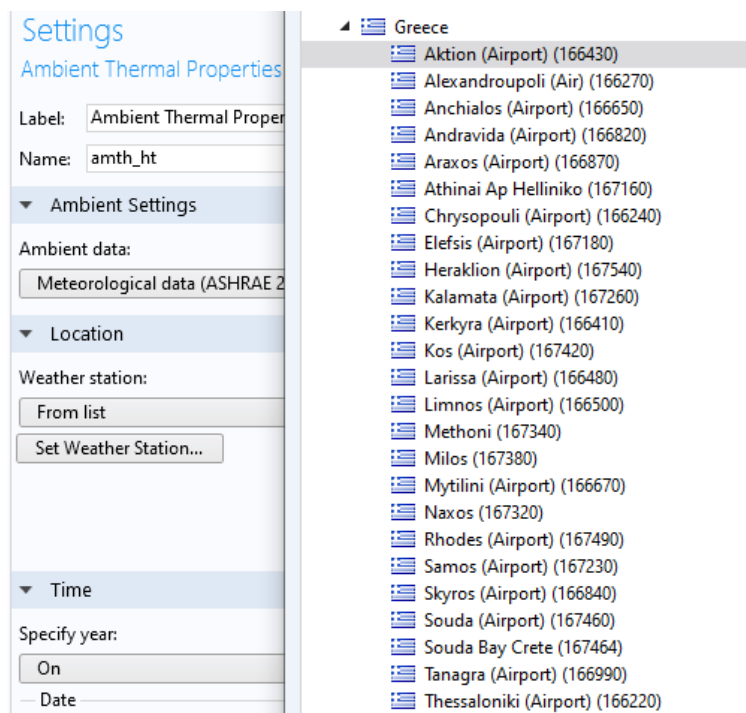


Εικόνα 9.3α Αρχική συνθήκη θερμοκρασίας του μοντέλου

#### 9.4 Εξωτερική Οριακή Συνθήκη – Εξωτερική Ροή Θερμότητας

Το αριστερό άκρο το μοντέλου, δηλαδή το πρώτο και το εξωτερικό σημείο της τοιχοποιίας, αποτελεί το σημείο στο οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το περιβάλλον. Αφού μεταφέρεται θερμότητα από τον αέρα του περιβάλλοντος που πρόκειται για ρευστό στο στερεό εξωτερικό τοίχωμα, λαμβάνει χώρα συναγωγή θερμότητας. Στο εξωτερικό τοίχωμα όμως προσπίπτει και ηλιακή ακτινοβολία, οπότε υπάρχει ροή θερμότητας και από θερμική ακτινοβολία. Ο ορισμός αυτών των δύο, με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά τους στην ροή θερμότητας προς την τοιχοποιία αποτέλεσε σημαντικό πρόβλημα κατά την δημιουργία του παρόντος μοντέλου.

Αυτό διότι, ενώ ο ορισμός μίας οριακής συνθήκης για τη συναγωγή θερμότητας είναι απλός, δεν υπάρχει ή τουλάχιστον δεν βρέθηκε στο πρόγραμμα κάποιος εξίσου απλός τρόπος να εισαχθεί η ηλιακή ακτινοβολία στο μονοδιάστατο μοντέλο. Για μοντέλα περισσότερων διαστάσεων το πρόγραμμα του Comsol® επιτρέπει τον ορισμό οριακής συνθήκης τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν μετεωρολογικά δεδομένα από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος, η οποία περιλαμβάνει δεδομένα της ASHRAE® 2013/2017 από πολυάριθμους μετεωρολογικούς σταθμούς.



Εικόνα 9.4α Παράδειγμα ορισμού περιβαλλοντικών θερμικών ιδιοτήτων με μετεωρολογικά δεδομένα της ASHRAE® 2013

Για να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, ακολουθήθηκε η εξής μέθοδος:

Χρησιμοποιήθηκαν θερμοκρασίες και τιμές ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας σε κάθετη επιφάνεια οι οποίες προήλθαν με χρήση του λογισμικού EnergyPlus® και δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα αρχεία θερμοκρασίας και τιμών ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθετη επιφάνεια (βόρειος, νότιος, ανατολικός και δυτικός προσανατολισμός) για τρεις πόλεις της Ελλάδας (Αθήνα, Άρτα και Θεσσαλονίκη) για ένα ολόκληρο τυπικό έτος.

Date/Time	Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area [W/m2]					Temperature [oC]
	North	East	South	West	Horizontal	
01-01-95 00:00	0	0	0	0	0	12.11
01-01-95 01:00	0	0	0	0	0	12.3
01-01-95 02:00	0	0	0	0	0	12.195
01-01-95 03:00	0	0	0	0	0	12.1
01-01-95 04:00	0	0	0	0	0	12.0475
01-01-95 05:00	0	0	0	0	0	11.9475
01-01-95 06:00	0	0	0	0	0	11.9
01-01-95 07:00	0	0	0	0	0	11.8475
01-01-95 08:00	16.6303	31.2188	26.6805	16.646	33.625	12.22
01-01-95 09:00	36.9812	45.9999	46.6089	37.0151	74.0366	12.8625
01-01-95 10:00	64.9388	89.804	108.337	65.0952	138.817	13.415
01-01-95 11:00	94.1478	151.712	280.146	95.6698	245.733	14.225
01-01-95 12:00	104.634	131.519	471.331	114.076	334.026	15.2775
01-01-95 13:00	93.5212	96.0179	319.803	142.949	258.783	16.0625
01-01-95 14:00	40.1763	40.436	63.5999	50.1929	85.2389	15.985
01-01-95 15:00	12.2081	12.2192	12.2087	12.2192	23.8625	15.3325
01-01-95 16:00	4.2505	4.25441	4.25072	4.25441	8.3875	14.685
01-01-95 17:00	0.49621	0.496667	0.496235	0.496667	0.9825	14.19

*Εικόνα 9.48 Η μορφή κατά την οποία ήταν διαθέσιμα τα μετεωρολογικά δεδομένα.*

Τα αρχεία αυτά συνδέθηκαν με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Comsol® μέσω της εξίσωσης: [55] (παραλλαγή του τύπου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ισοδύναμων φορτίων  $q_{eq}$ )

$$T_{eq} = T_{amb} + \frac{(a \cdot q_{sol})}{h_{ext}} \quad (1)$$

όπου:

$T_{eq}$ , η ισοδύναμη θερμοκρασία του σημείου το περιβάλλοντος που έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό τοίχωμα

$T_{amb}$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος από τα μετεωρολογικά δεδομένα

$a$ , ο συντελεστής απορρόφησης ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 0,6

$q_{sol}$ , η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία από τα μετεωρολογικά δεδομένα σε  $W/m^2$

και  $h_{ext}$ , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το εξωτερικό τοίχωμα, οποίος θεωρήθηκε ίσος με  $25 \text{ W/m}^2/\text{K}$  από τυπικές τιμές. [53]

Πρόκειται δηλαδή για μία εξίσωση που συνδυάζει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και που παρέχει μια ισοδύναμη, που μπορεί να αξιοποιηθεί και να ενταχθεί πιο εύκολα στο μοντέλο.

Αφού έγιναν οι υπολογισμοί για όλες τις περιπτώσεις εξωτερικά του Comsol® με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων Excel®, προκύπτουν δεδομένα που περιγράφονται τελικά από την παρακάτω συνάρτηση της ισοδύναμης θερμοκρασίας με τον χρόνο.

$$T_{eq}(t) = T_{amb}(t) + \frac{(a \cdot q_{sol}(t))}{h_{ext}} \quad (2)$$

Η συνάρτηση αυτή μπορεί να ενταχθεί στο μοντέλο ως μία παρεμβολή σημείων από πινακοποιημένη μορφή η οποία εξάγεται από το Excel® και εισάγεται στο Comsol® ως όρισμα. Αφού γίνει αυτό, τότε η  $T_{eq}$  μπορεί να ορισθεί ως η εξωτερική θερμοκρασία για την οριακή συνθήκη της εξωτερικής ροής θερμότητας.

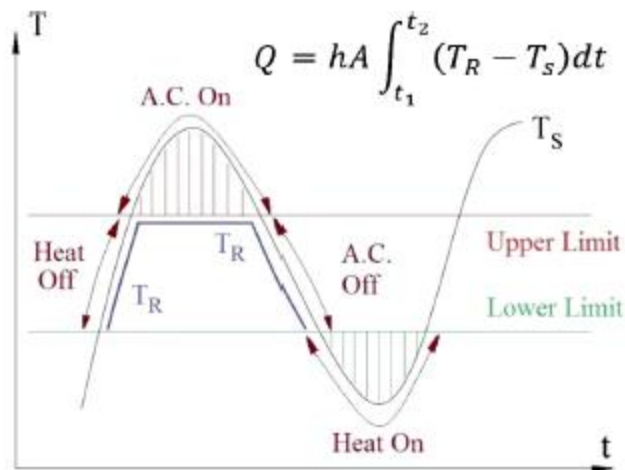
The screenshot shows the 'Settings' window for a 'Heat Flux' boundary condition in Comsol Multiphysics. The 'Heat Flux' section is expanded, and 'Convective heat flux' is selected. The equation is  $q_0 = h \cdot (T_{ext} - T)$ . The 'Heat transfer coefficient' is set to 'User defined' with a value of  $h_{ext}$  in  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . The 'External temperature' is also set to 'User defined' with a value of  $T_{eq}(t)$  in  $\text{K}$ .

Εικόνα 9.4γ Ορισμός της  $T_{eq}$  ως εξωτερικής θερμοκρασίας για τη ροή θερμότητας.



### 9.5 Εσωτερική Οριακή Συνθήκη – Εσωτερική Ροή Θερμότητας

Το δεξί άκρο του μοντέλου, δηλαδή το τελευταίο σημείο της τοιχοποιίας είναι αυτό που έρχεται σε επαφή με τον εσωτερικό αέρα των δωματίων. Πάλι εδώ προέκυψε ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς για να γίνουν παραμετρικές μελέτες για διάφορες περιπτώσεις πόλεων, δεν υπήρχαν μετρήσεις για την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα. Παράλληλα, κύριος σκοπός της μελέτης είναι ο υπολογισμός των θερμικών φορτίων του κτιρίου, οπότε δεν μπορούσε αυτή θερμοκρασία να θεωρηθεί σταθερή. Αντ' αυτού λοιπόν, εφαρμόστηκε μία μεθοδολογία, την οποία χρησιμοποίησαν και οι Sharifi et al. [54] σε μία πρόσφατη έρευνα τους πάνω στην αξιοποίηση γυψοσανίδων με ΥΑΦ σε κτιριακές εφαρμογές. Σύμφωνα με αυτή, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα απαιτείται να βρίσκεται εντός των ορίων θερμικής άνεσης, ενώ οποιαδήποτε απόκλιση της θερμοκρασίας αυτής λόγω της θερμοκρασίας του εσωτερικού τοιχώματος, είναι αυτή που ενεργοποιεί ένα θεωρητικό κλιματιστικό σύστημα που επιχειρεί να την επαναφέρει εντός των ορίων άνεσης.



Εικόνα 9.5α Γραφική απεικόνιση της οριοθετημένης περιοχής της θερμοκρασίας  $T_R$  του δωματίου και της θερμοκρασίας εσωτερικού τοιχώματος  $T_s$

Η ολοκλήρωση της σκιαγραφημένης περιοχής του παραπάνω γραφήματος, δίνει μία ενδεικτική εικόνα για την ενδεχόμενα επίπεδα των ενεργειακών καταναλώσεων – ψυκτικών φορτίων. Περισσότερα για αυτό στην ενότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Η οριοθέτηση αυτή, για την θερμική άνεση στο εσωτερικό του δωματίου, έγινε με την εισαγωγή στο Comsol® μίας μεταβλητής  $T_{room}$  με την εξής υποθετική συνθήκη:

if( $T < 293.15, 293.15, \text{if}(T > 299.15, 299.15, T)$ )

Η συνθήκη αυτή επιτρέπει στην τιμή της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου να μεταβάλλεται αν βρίσκεται εντός των ορίων θερμικής άνεσης και να παραμένει σταθερή και ίση με τις οριακές τιμές άνεσης όταν είτε τις υπερβαίνει, είτε παραμένει χαμηλότερη.

Για το συγκεκριμένο μοντέλο ορίστηκαν όρια 20 και 26 °C. Αυτή αποτελεί μία τυπική ζώνη άνεσης για ήπια ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία όμως δεν επηρεάζει την λειτουργία του ΥΑΦ αυτή καθαυτή, αλλά τα επίπεδα των φορτίων όπως θα δειχθεί παρακάτω στην ενότητα της παρουσίασης των αποτελεσμάτων. [54]

Ως εσωτερική συνθήκη ροής θερμότητας λοιπόν, ορίζεται για το τελευταίο σημείο της τοιχοποιίας η συναγωγή θερμότητας από αυτό προς τον αέρα του δωματίου, ο οποίος θεωρείται από το μοντέλο ως η εξωτερική θερμοκρασία για το σύστημα. Ο συντελεστής μεταφοράς hint ορίστηκε ίσος με 7,69 W/m<sup>2</sup>/K από τυπικές τιμές για εσωτερικό τοίχωμα. [53]

Settings  
Heat Flux

Label: Heat Flux Internal

Boundary Selection

Override and Contribution

Equation

Material Type

Heat Flux

☐ General inward heat flux

☒ Convective heat flux

$q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$

Heat transfer coefficient:

User defined

Heat transfer coefficient:

$h$  hint W/(m<sup>2</sup>.K)

External temperature:

$T_{\text{ext}}$  User defined

Troom K

Εικόνα 9.56 Ορισμός της εσωτερικής οριακής συνθήκης

### 9.6 Υπολογιστικό Πλέγμα

Το υπολογιστικό πλέγμα του υπολογιστικού μοντέλου προσομοιώσεων είναι το ίδιο με αυτό του μοντέλου της πιστοποίησης, δηλαδή αποτελείται από 189 ισαπέχοντες υπολογιστικούς κόμβους.

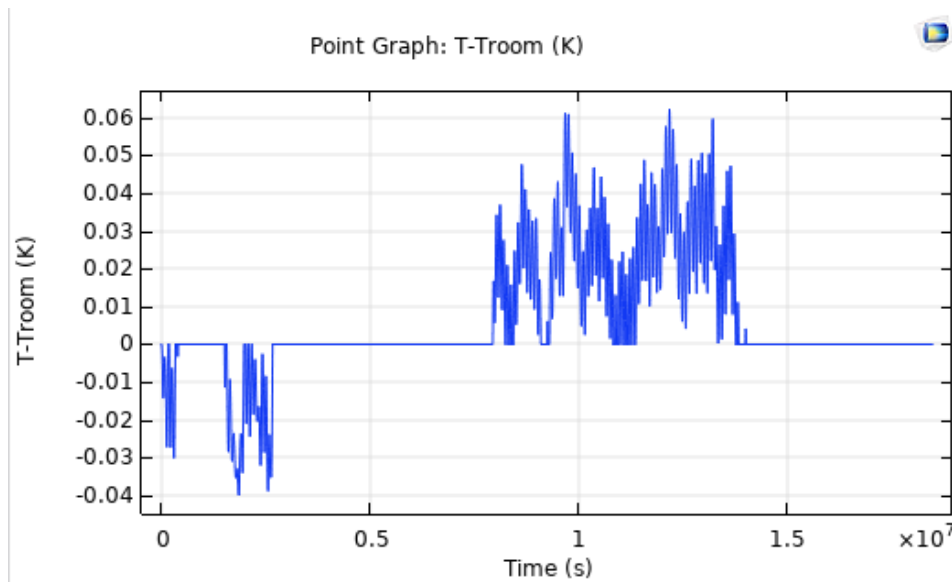
### 9.7 Υπολογιστικός Χρόνος – Επιλύτης

Το πρόβλημα από τη φύση του εξαρτάται από τον χρόνο, οπότε για την υπολογιστική διαδικασία πρέπει να γίνει η επιλογή ενός χρονικού βήματος για τους υπολογισμούς και ένα χρονικό σημείο για την ολοκλήρωσή τους.

Επειδή τα μετεωρολογικά δεδομένα ήταν δοσμένα με χρονικό βήμα μίας ώρας (3600 s), κρίθηκε προτιμότερη η επιλογή του χρονικού βήματος για τους υπολογισμούς να είναι επίσης ίση με 3600 s. Έγιναν υπολογισμοί και με μικρότερο χρονικό βήμα, αλλά δεν παρείχαν κάποια ποιοτική βελτίωση των αποτελεσμάτων, ενώ πιο μικρό βήμα συνεπάγεται αντίστοιχα μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, ο οποίος μπορεί να γίνει δύσχρηστος κατά την επεξεργασία του.

Η χρονική περίοδος των υπολογισμών εξαρτάται από την περίοδο για την οποία απαιτείται η εξαγωγή συμπερασμάτων. Αφού στόχος του παρόντος ήταν ο προσδιορισμός ψυκτικών φορτίων, επιλέχθηκε μία επτάμηνη περίοδος του έτους που περιλαμβάνει τους θερμότερους μήνες του, από τον Μάιο έως και τον Οκτώβριο, όπου και αναμένεται η ενεργοποίηση και επομένως μεγαλύτερη επίδραση της χρήσης ΥΑΦ. Μπορεί κατά περίπτωση σε κάποιους από αυτούς τους μήνες να εμφανίζονται θερμικά φορτία, αλλά αυτά μπορούν να παραλειφθούν κατά την επεξεργασία των δεδομένων όπως θα δειχθεί στη συνέχεια. Οπότε, ως πέρας των υπολογισμών ορίστηκαν τα 18.486.000 s, ή πιο απλά 7 μήνες.

Για την καλύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την αντιστοιχία τους με τα μετεωρολογικά δεδομένα, ορίστηκε επίσης σταθερό βήμα 3600 s για τον χρονικά εξαρτημένο επιλύτη. Κάτι τέτοιο αποδίδει αποτελέσματα με σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ τους, ίσο με 3600 s.



Γράφημα 9.7 Γράφημα διαφοράς  $T_s-T_{room}$  περίοδος 7 μηνών (Άρτα)

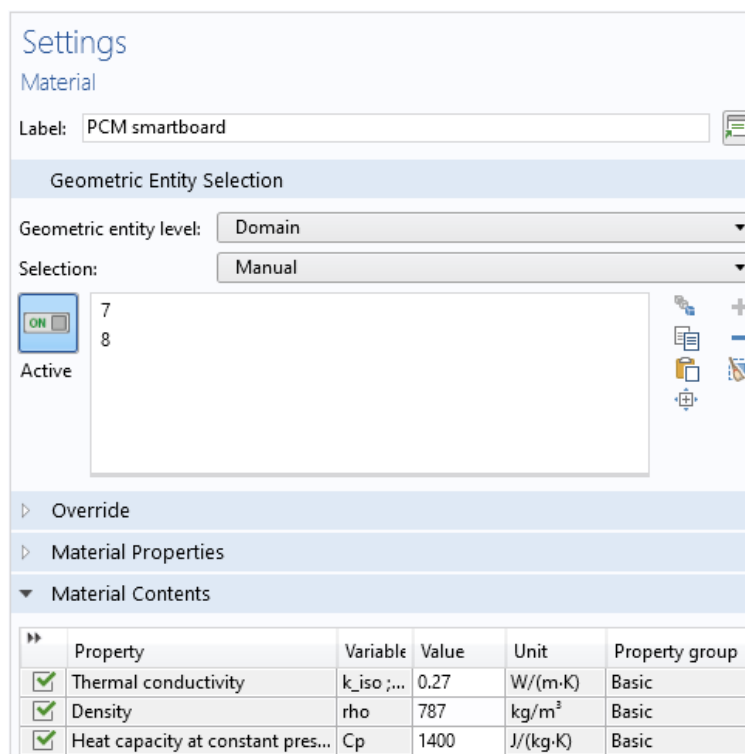
Ενδεικτικά παρουσιάζεται το γράφημα της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού τοιχώματος και θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα για την περίπτωση της Άρτας, τοίχωμα νότιου προσανατολισμού. Οι αρχικές αρνητικές τιμές είναι ενδεικτικές της ύπαρξης θερμικών φορτίων κατά τις πρώτες ημέρες αυτής της υπολογιστικής περιόδου, δηλαδή κατά τον μήνα Απρίλιο. Οι θετικές τιμές, είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω ενότητες παρουσίασης αποτελεσμάτων, και επειδή εμφανίζονται σε μία πιο σύντομη χρονική περίοδο, τελικά παρουσιάζονται αποτελέσματα για τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο, όσο αφορά τα ψυκτικά φορτία. Αυτό ισχύει για όλες τις προσομοιώσεις για τα ψυκτικά φορτία, οπότε δε λαμβάνονται υπόψη φορτία των μηνών Απριλίου και Οκτωβρίου, παρόλο που συμπεριλαμβάνονται στα υπολογιστικά μοντέλα για λόγους καλύτερης εποπτείας του προβλήματος.

## 9.8 Η Θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ

Το ΥΑΦ εντάχθηκε στο μοντέλο κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο παρουσιάστηκε στην αντίστοιχη ενότητα του μοντέλου της πιστοποίησης.

Η επίδραση της ύπαρξης ενός δομικού ΥΑΦ στην τοιχοποιία μπορεί να γίνει με τη σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχη περίπτωση κατά την οποία αυτό απουσιάζει. Έτσι, για κάθε παραμετρική μελέτη δημιουργήθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα:

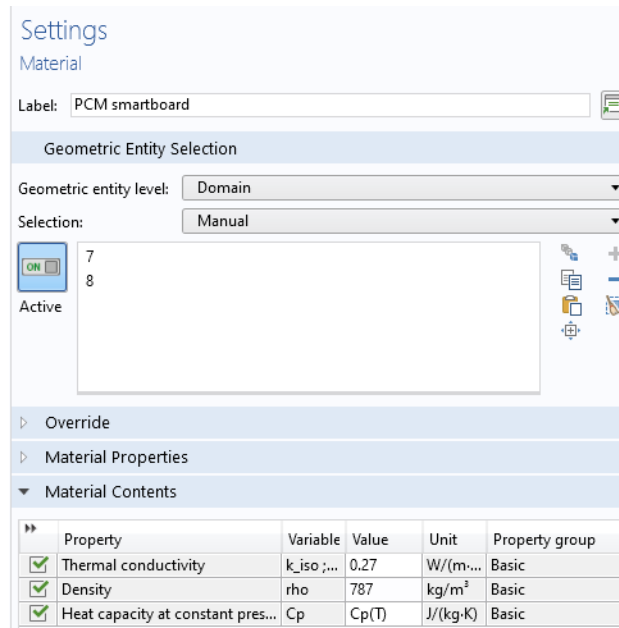
Στο πρώτο, δεν υπάρχει γυψοσανίδα ΥΑΦ και αντ' αυτού θεωρείται ότι στη θέση της υπάρχει μία γυψοσανίδα με σταθερή θερμοχωρητικότητα, ίση με αυτή εκτός των ορίων αλλαγής φάσης, δηλαδή 1400 J/Kg/K.



Property	Variable	Value	Unit	Property group
Thermal conductivity	k_iso ;...	0.27	W/(m·K)	Basic
Density	rho	787	kg/m³	Basic
Heat capacity at constant pres...	Cp	1400	J/(kg·K)	Basic

Εικόνα 9.8α Γυψοσανίδες με σταθερή  $C_p$

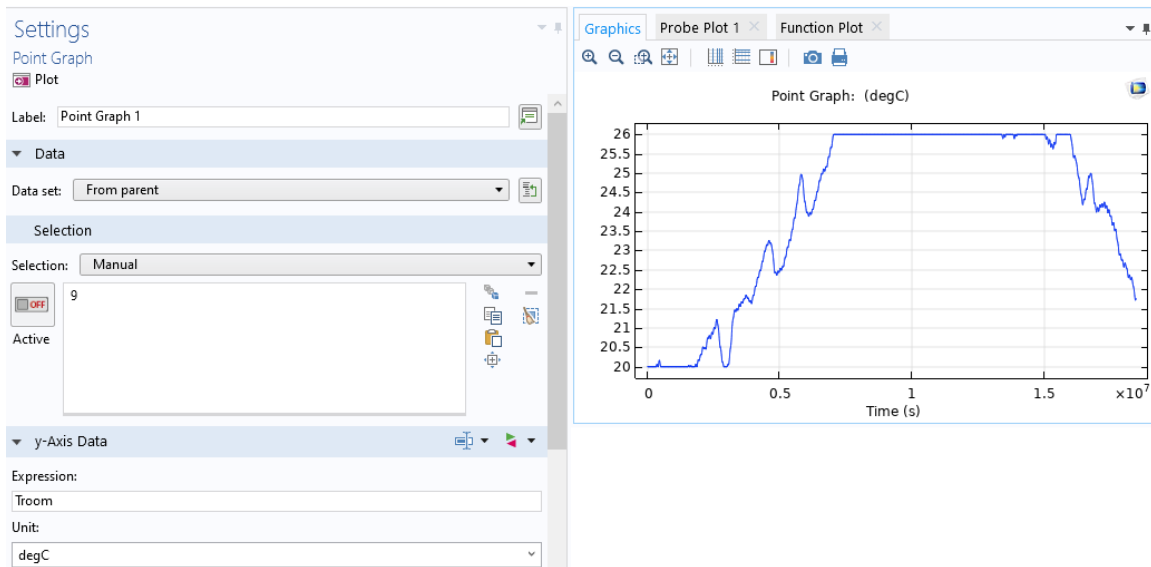
Στο δεύτερο, υπάρχει γυψοσανίδα ΥΑΦ (smartboard) και αυτό γίνεται με τον κατάλληλο ορισμό των ιδιοτήτων του υλικού για τα τελευταία στρώματα του μοντέλου, στο οποίο αυτή είχε τοποθετηθεί. Αυτό που μεταβάλλεται σε σχέση με την προηγούμενη, θεωρητική γυψοσανίδα, είναι η θερμοχωρητικότητα του υλικού, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού.



Εικόνα 9.8β Γυψοσανίδες με εξαρτημένη  $C_p$

## 9.9 Εξαγωγή και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων Μοντέλου Προσομοίωσης

Μετά τη δημιουργία του κατάλληλου μοντέλου κατά περίπτωση παραμετρικής μελέτης, μπορούν να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί από το πρόγραμμα και να προκύψουν αποτελέσματα προς επεξεργασία. Τα αποτελέσματα που αφορούν το παρόν είναι οι θερμοκρασίες του εσωτερικού τοιχώματος και του εσωτερικού χώρου. Σαν είσοδος, λοιπόν, θεωρείται η επίδραση της ισοδύναμης θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ως έξοδος οι θερμοκρασίες που αποτελούν δείκτη για την θερμική άνεση του εσωτερικού χώρου.



Εικόνα 9.9α Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα  $T_{room}$

Ομοίως μπορούν να παραχθούν γραφήματα και πίνακες για θερμοκρασίες για οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου, όπως και για το τελευταίο σημείο της τοιχοποιίας. Το εσωτερικό αυτό σημείο έχει θερμοκρασίες  $T_s$ . Ζητούμενο τελικά για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι η εύρεση της διαφοράς  $T_s - T_{room}$ .

Settings  
Point Graph  
Plot

Label: Ts-Troom

Data

Selection

Selection: Manual

Active

9

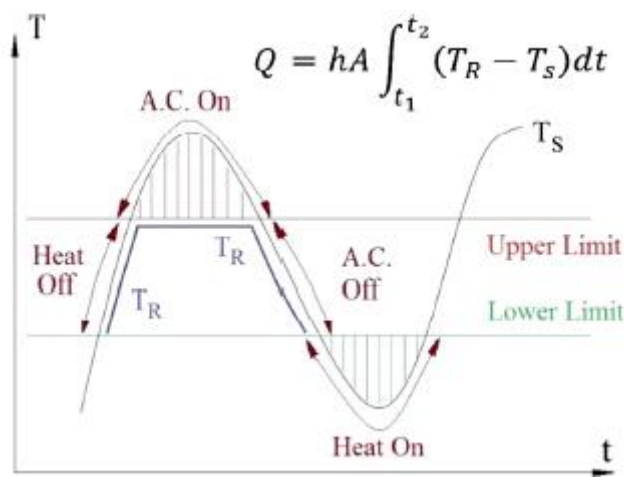
y-Axis Data

Expression: T-Troom

Unit: K

Εικόνα 9.9β Ορισμός παραμέτρων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για τη διαφορά θερμοκρασιών  $T_s$ -Troom.

Σε αυτό το σημείο μπορεί πλέον να αναλυθεί περισσότερο η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την εύρεση των θερμικών φορτίων. [54]



Εικόνα 9.9γ Παρατίθεται πάλι το γράφημα της μεθόδου για καλύτερη εποπτεία.



Η θερμοκρασία  $T_R$  είναι ταυτόσημη με την  $T_{room}$  του μοντέλου και είναι η οριοθετημένη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, η οποία προκύπτει από τα επίπεδα της θερμικής άνεσης. Η θερμοκρασία  $T_s$  είναι η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος. Τα φορτία της θερμότητας προκύπτουν λοιπόν από την εξίσωση:

$$Q = hA \int_{t_1}^{t_2} (T_R - T_s) dt \quad (3)$$

όπου:

$Q$ , το θερμικό φορτίο σε  $W$

$h$ , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε  $W/m^2/K$

$A$ , η επιφάνεια του τοιχώματος σε  $m^2$

$t_2$  και  $t_1$ , δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές σε  $s$  ως άκρα της ολοκλήρωσης της διαφοράς των θερμοκρασιών:

$T_R$ , η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου

και  $T_s$ , η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοιχώματος

Επειδή το υπολογιστικό μοντέλο είναι μονοδιάστατο, πρέπει να γίνει αδιαστατοποίηση ως προς την επιφάνεια του τοιχώματος. Ως συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ορίζεται τυπική τιμή  $h_{int}=7,69 W/m^2/K$  [53] για εσωτερικό τοίχωμα. Οπότε η παραπάνω εξίσωση, μετατρέπεται για τις ανάγκες του παρόντος ως εξής:

$$\frac{Q}{A} = h_{int} \int_{t_1}^{t_2} (T_s - T_{room}) dt \quad (4)$$

Οπότε, τα φορτία προκύπτουν σε  $W/m^2$ . Αν αυτά διαιρεθούν περεταίρω με  $3600 s$ , τότε τελικά τα φορτία αποδίδονται σε  $Wh/m^2$ . Αυτή η μονάδα μέτρησης είναι αυτή που χρησιμοποιείται από παρόμοια έρευνα των Biswas et al. [55], η οποία χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την παρούσα.

Το παραπάνω ολοκλήρωμα μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας τον κανόνα του τραπεζίου, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\int_a^b f(x)dx \cong (b - a) \cdot \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

Αν για τη δική μας περίπτωση ορίσουμε ως συνάρτηση  $f(t)=T_{\text{room}}-T_s$ , τα άκρα της ολοκλήρωσης είναι δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_2$ , οπότε η διαφορά  $b-a$  είναι πάντα σταθερή και ίση με 3600 s όπως έχει οριστεί στο υπολογιστικό μοντέλο.

Η παραπάνω μέθοδος κρίνεται ότι για την παρούσα μελέτη δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω της μικρής τιμής που λαμβάνει η συνάρτηση  $f$  για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Ακολουθώντας τον κανόνα Simpson 1/3, επειδή χρειαζόταν ο ορισμός μίας ενδιάμεσης τιμής για την  $f$ , αυτή ορίστηκε ως η μέση τιμή των άκρων, και λόγω των ισαπέχοντων διαστημάτων, προέκυψαν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με την μέθοδο του τραπεζίου.

Οι παραπάνω υπολογισμοί για τα φορτία έγιναν σε υπολογιστικά φύλλα Excel®, στα οποία εξαγόταν κάθε φορά από το Comsol® η τιμή της διαφοράς  $T_{\text{room}}-T_s$ , γινόταν η ολοκλήρωση με την παραπάνω μέθοδο, και οι τελικές τιμές μπορούσαν πλέον να αθροιστούν έτσι ώστε να προκύψουν οι ζητούμενες μηνιαίες τιμές, αναλόγως με την περίπτωση.

Από αυτές τις τιμές, πραγματοποιώντας και την σύγκριση κάθε φορά μεταξύ μοντέλων με και χωρίς ΥΑΦ, προκύπτουν και χρήσιμα ποσοστά, ενδεικτικά της συνεισφοράς των ΥΑΦ στην μείωση των φορτίων.

# 10

## Παρουσίαση Παραμετρικών Μελετών – Αποτελεσμάτων

Για την καλύτερη διερεύνηση των αποτελεσμάτων που αποφέρει η χρήση ΥΑΦ στην τοιχοποιία, πραγματοποιήθηκαν ποικίλες παραμετρικές μελέτες. Εξετάστηκε η επίδραση που τυχόν επιφέρει στο μοντέλο η κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται η τοιχοποιία, ο τύπος του χρησιμοποιούμενου ΥΑΦ, ο προσανατολισμός του τοιχώματος και η θέση που μπορεί να έχει η γυψοσανίδα ΥΑΦ μέσα στην τοιχοποιία. Οι παράμετροι που ορίστηκαν για την κάθε περίπτωση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.

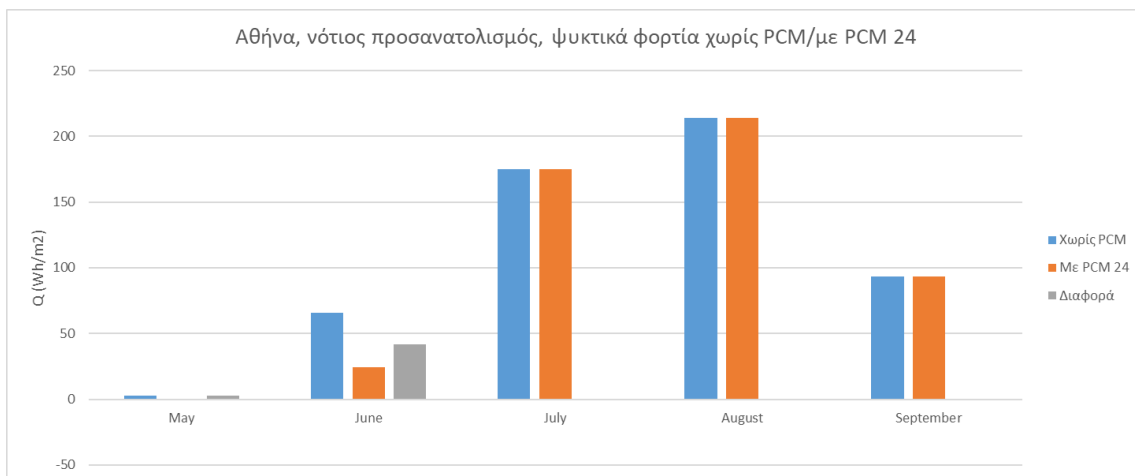
### 10.1 Επίδραση Κλιματικής Ζώνης

Γενικά, διαθέσιμα υπήρχαν τα μετεωρολογικά δεδομένα τριών πόλεων: για την Αθήνα, την Άρτα και την Θεσσαλονίκη. Επιλέχθηκαν αυτές οι πόλεις, καθώς οι περιβαλλοντικές τους συνθήκες είναι χαρακτηριστικές για διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Το κλίμα της Αθήνας είναι ιδιαίτερα θερμό το καλοκαίρι, αυτό της Άρτας έχει τα χαρακτηριστικά του δυτικού κλίματος της χώρας, ενώ η Θεσσαλονίκη είναι μια χαρακτηριστική πόλη στα βόρεια της.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) [53], η Αθήνα ανήκει στην Κλιματική Ζώνη Β, ενώ η Θεσσαλονίκη στην Κλιματική Ζώνη Γ. Η Άρτα ανήκει επίσης στην Κλιματική Ζώνη Β, όμως επιλέχθηκε καθώς είναι μία πόλη κοντά σε αυτή της Αμφιλοχίας, όπου έχουν γίνει αντίστοιχες μελέτες για την πιλοτική κατοικία που κατασκευάστηκε εκεί.

Καταρχάς εξετάζεται η επίδραση του ΥΑΦ στα ψυκτικά φορτία, σε σχέση με την περίπτωση που αυτό δεν υφίσταται στην τοιχοποιία και στη θέση του έχει χρησιμοποιηθεί απλή γυψοσανίδα. Τέτοια φορτία απαντώνται κατά τους θερμούς μήνες του έτους, οπότε η περίοδος υπολογισμών ξεκινά τον Μάιο και ολοκληρώνεται στο τέλος του Σεπτεμβρίου για κάθε περίπτωση.

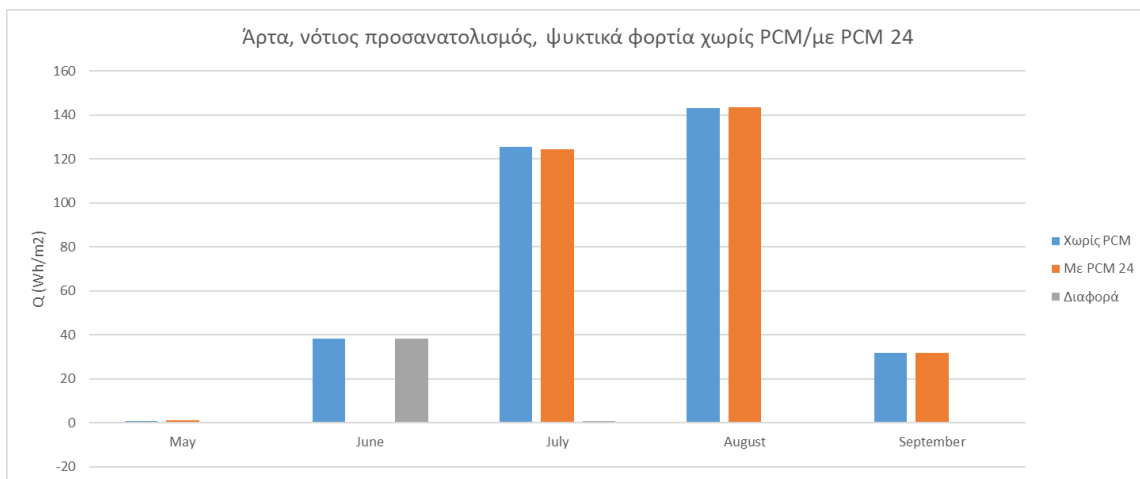
Παράλληλα, εξετάζεται το μέγεθος αυτής της επίδρασης όταν στο μοντέλο εντάσσονται τα μετεωρολογικά δεδομένα μέσω της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας τοιχώματος. Αφού δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα για τις τρεις πόλεις και τοίχωμα νότιου προσανατολισμού, προέκυψαν τα αποτελέσματα που ακολουθούν:



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	2.63	June	65.75	July	175.19	August	214.26	September	93.39 [Wh/m²]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	0.00	June	24.06	July	175.12	August	214.29	September	93.17 [Wh/m²]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	2.63	June	41.69	July	0.07	August	-0.03	September	0.23 [Wh/m²]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	551.23	[Wh/m²]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	506.64	[Wh/m²]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	44.589	[Wh/m²]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	8.09	%

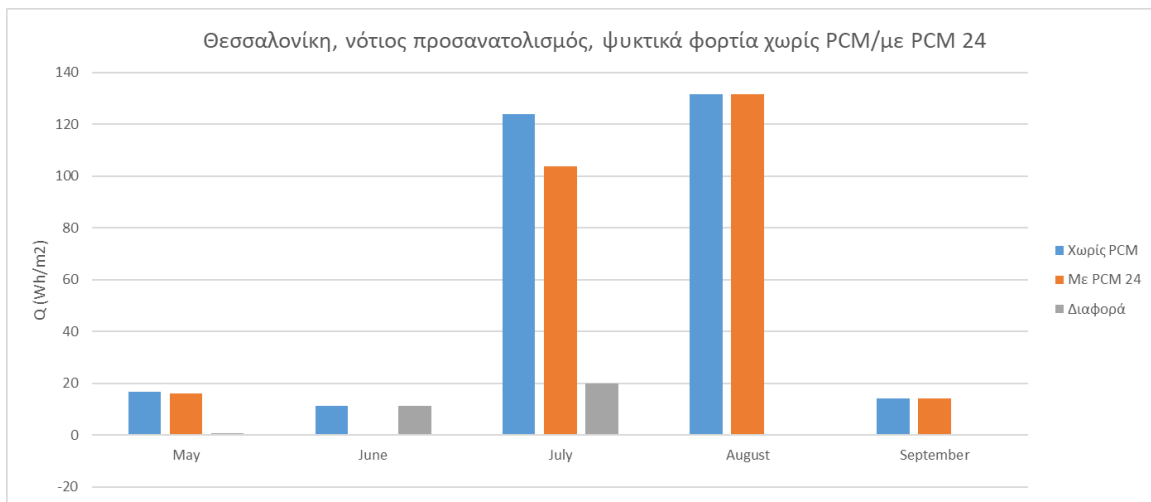
Αποτελέσματα 10.1α Αθήνα, νότιος προσανατολισμός, PCM 24



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	0.98	June	38.34	July	125.45	August	143.10	September	31.77 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	1.34	June	0.00	July	124.53	August	143.27	September	31.85 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	-0.36	June	38.34	July	0.92	August	-0.17	September	-0.08 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	339.63	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	300.98	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	38.65	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	11.38	%

Αποτελέσματα 10.1β Άρτα, νότιος προσανατολισμός, PCM 24



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	16.88	June	11.16	July	123.93	August	131.69	September	14.20 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	16.05	June	0.00	July	103.92	August	131.71	September	14.07 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	0.83	June	11.16	July	20.01	August	-0.01	September	0.13 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	297.87	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	265.75	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	32.12	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	10.78	%

Αποτελέσματα 10.1γ Θεσσαλονίκη, νότιος προσανατολισμός, PCM 24

Πόλη (Κλιματική Ζώνη)	Συνολικά Ψυκτικά Φορτία χωρίς PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	Συνολικά Ψυκτικά Φορτία χωρίς PCM 24 [Wh/m <sup>2</sup> ]	Συνολική Μείωση Φορτίων (Επίδραση PCM) [Wh/m <sup>2</sup> ]	Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων [%]
Αθήνα(Β)	551,23	506,64	44,59	8,09
Άρτα(Β)	339,63	300,98	38,65	11,38
Θεσσαλονίκη(Γ)	297,87	265,75	32,12	10,78

*Πίνακας 10.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την επίδραση της κλιματικής ζώνης*

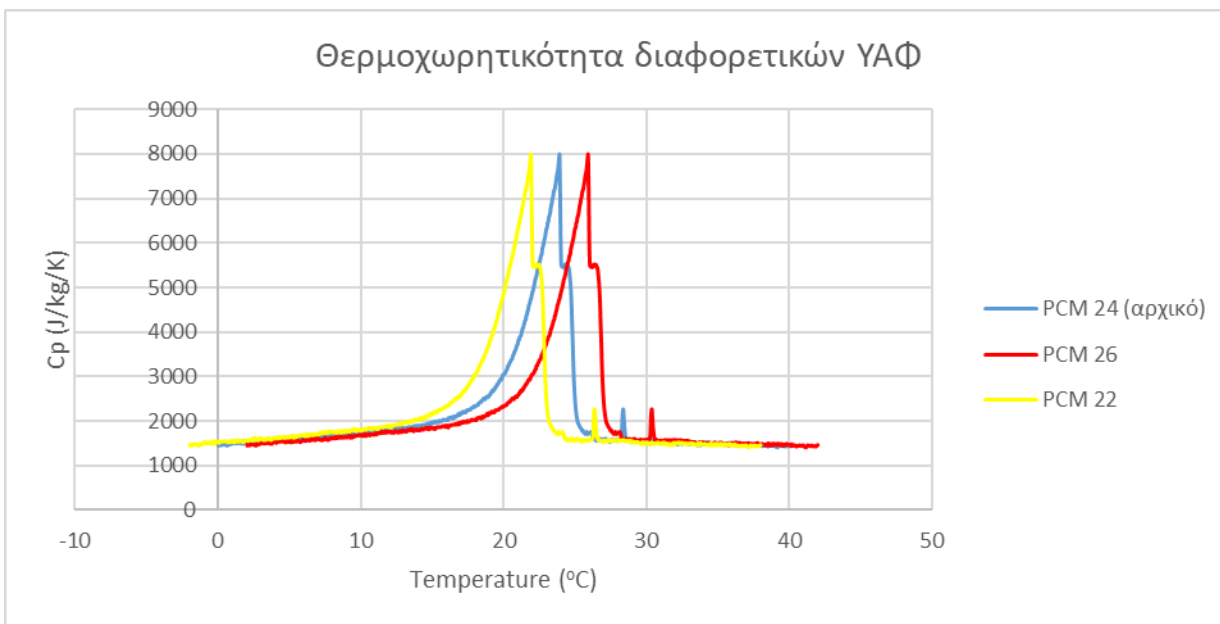
Ξεκινώντας από τα πιο αναμενόμενα συμπεράσματα, παρατηρούμε ότι οι ανάγκες για ψύξη είναι αισθητά μεγαλύτερες για τους θερινούς μήνες. Ωστόσο, η επίδραση του ΥΑΦ γίνεται αισθητή κυρίως τον Ιούνιο. Αυτό οφείλεται στην μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τη δημιουργία του μοντέλου. Σύμφωνα με αυτή, δεν υφίσταται κάποιος φυσικός αερισμός ή κάποιο σύστημα ψύξης του εσωτερικού αέρα της οικίας. Αντ' αυτού, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα υπολογίζεται από το πρόγραμμα, οριοθετείται με βάση τις προδιαγραφές που ορίστηκαν για τα όρια θερμικής άνεσης και εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες. Κατά τους θερινούς μήνες, καθώς η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται καθημερινά, αυξάνεται και η θερμοκρασία της γυψοσανίδας του ΥΑΦ. Όταν αυτή η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 24 °C, περίπου, για το συγκεκριμένο υλικό η αλλαγή φάσης ολοκληρώνεται και η λειτουργία του ως μέσω αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παύει να υφίσταται. Αν το υλικό παραμείνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει τους θερινούς μήνες, δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδρασή του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την περίοδο των θερινών μηνών στην Αθήνα η ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 23 και 45 °C.

Όπως ήταν επίσης αναμενόμενο, τα συνολικά φορτία για την Αθήνα προέκυψαν μεγαλύτερα από τις άλλες πόλεις καθώς διαθέτει το θερμότερο κλίμα από αυτές. Αντίστοιχα, τα χαμηλότερα συνολικά φορτία εμφανίστηκαν για την πόλη της Θεσσαλονίκης, η οποία έχει σαφώς πιο ήπιες καιρικές συνθήκες κατά τους θερινούς μήνες, κάτι που προέκυψε και από τα μετεωρολογικά δεδομένα.

Ως προς την επίδραση του ΥΑΦ στη μείωση των ψυκτικών φορτίων, αυτή προέκυψε σημαντικότερη στην περίπτωση της Αθήνας. Αυτό οφείλεται στις μετεωρολογικές συνθήκες αυτής της πόλης και τις υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά τον μήνα Ιούνιο. Το συγκεκριμένο υλικό αλλαγής φάσης με εύρος λειτουργίας 19 έως 26 °C έχει σημαντικότερη επίδραση σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όπως θα δειχθεί και στην επόμενη ενότητα παρουσίασης παραμετρικής μελέτης με βάση τον τύπο του ΥΑΦ.

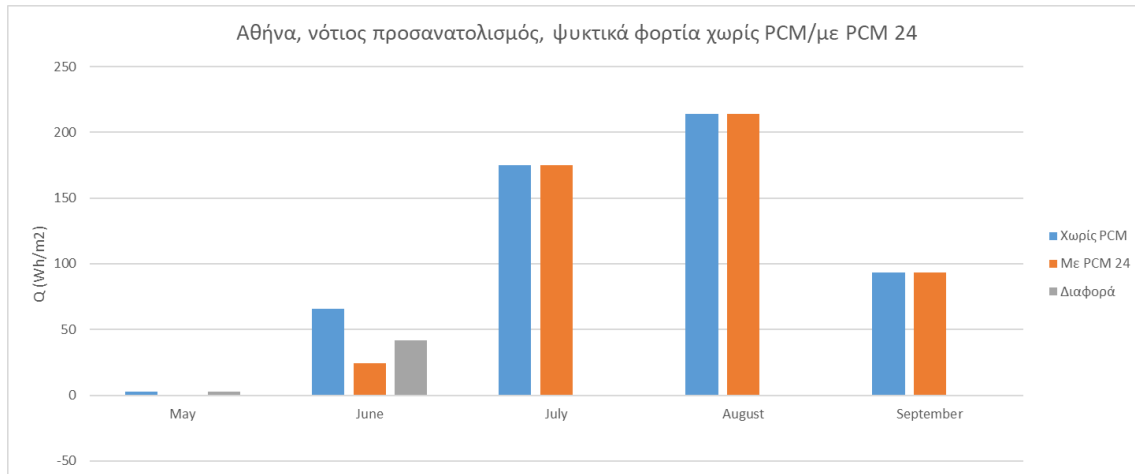
## 10.2 Επίδραση Τύπου ΥΑΦ

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η επίδραση του τύπου ΥΑΦ, με έμφαση στη θερμοκρασία ενεργοποίησής του. Για αυτόν τον σκοπό θεωρήθηκαν δύο νέα υλικά, με βάση όμως το ΥΑΦ για το οποίο υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις. Για το καθένα από αυτά, ορίστηκε το μέγιστο της θερμοχωρητικότητάς τους να βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία. Προσθέτοντας ή αφαιρώντας 2 °C από τις τιμές που δίνουν την καμπύλη του αρχικού ΥΑΦ, προκύπτουν αντίστοιχα δύο νέες καμπύλες οι οποίες μπορούν να εισαχθούν στο υπολογιστικό πρόγραμμα, αντί της αρχικής. Έτσι, τα ΥΑΦ καλούνται πλέον PCM 24, PCM 22 και PCM 26 αντίστοιχα.



Εικόνα 10.2α Καμπύλες θερμοχωρητικότητας PCM 22/24/26

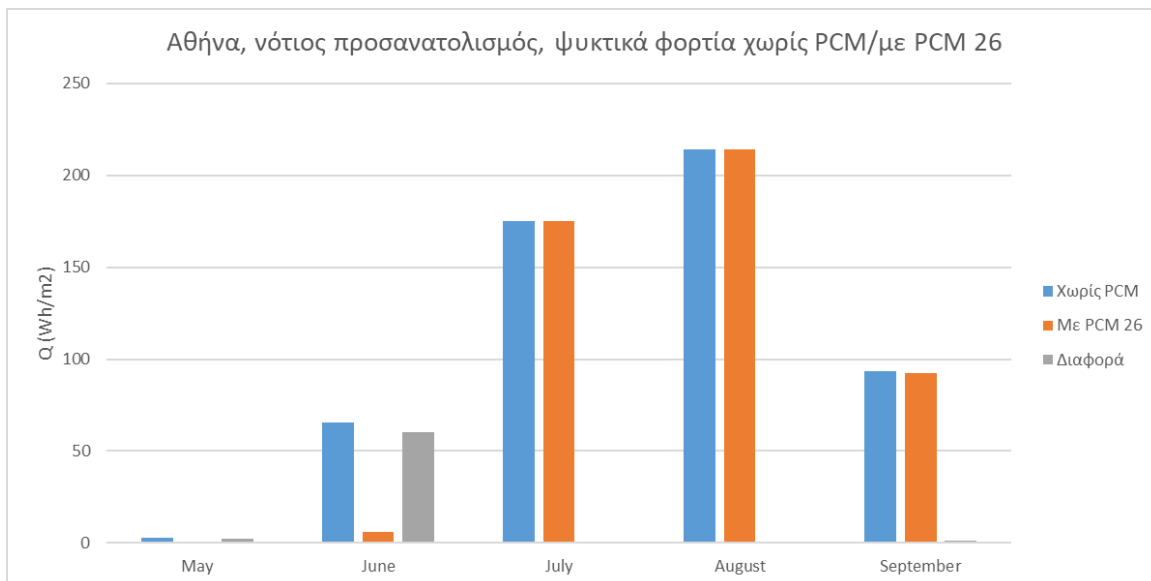
Έγιναν προσομοιώσεις για το τοίχωμα νότιου προσανατολισμού, για τους τρεις τύπους ΥΑΦ, για τις πόλεις της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης και τα αποτελέσματα ακολουθούν:



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	2.63	June	65.75	July	175.19	August	214.26	September	93.39 [Wh/m²]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	0.00	June	24.06	July	175.12	August	214.29	September	93.17 [Wh/m²]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	2.63	June	41.69	July	0.07	August	-0.03	September	0.23 [Wh/m²]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	551.23	[Wh/m²]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	506.64	[Wh/m²]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	44.589	[Wh/m²]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	8.09	%

#### Αποτελέσματα 10.2α Αθήνα, νότιος προσανατολισμός, PCM 24

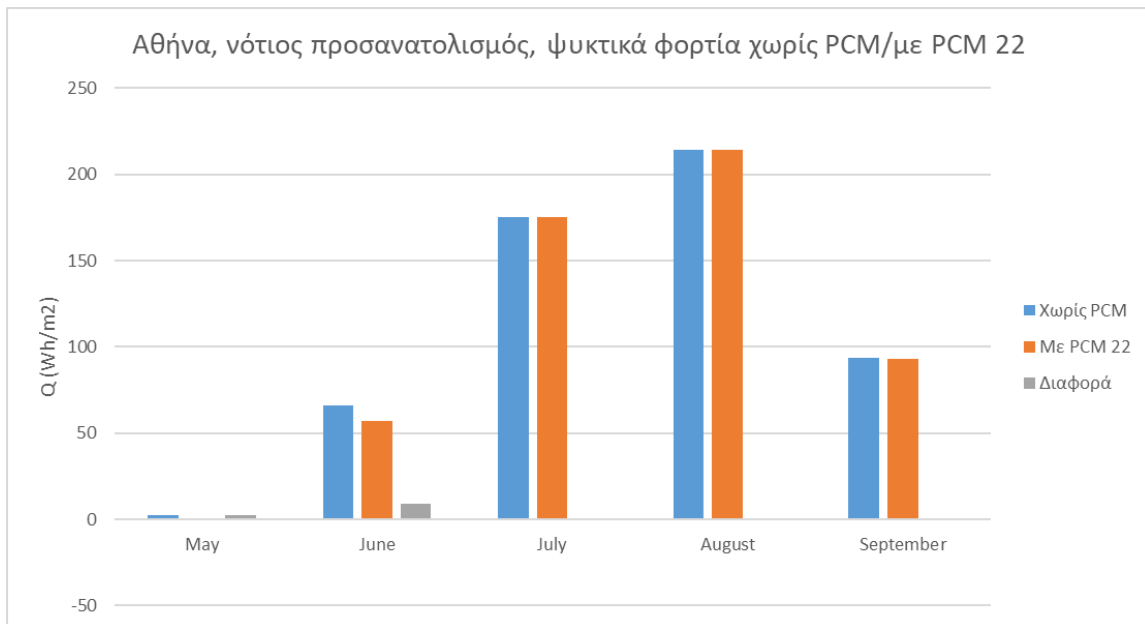




Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ										
May	2.63	June	65.75	July	175.19	August	214.26	September	93.39	[Wh/m^2]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ										
May	0.29	June	5.69	July	175.02	August	214.24	September	92.16	[Wh/m^2]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων										
May	2.34	June	60.05	July	0.17	August	0.02	September	1.23	[Wh/m^2]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	551.23	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	487.40	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	63.82	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	11.58	%

Αποτελέσματα 10.2β Αθήνα, νότιος προσανατολισμός, PCM 26



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ										
May	2.63	June	65.75	July	175.19	August	214.26	September	93.39	[Wh/m^2]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ										
May	0.00	June	56.79	July	175.15	August	214.28	September	93.28	[Wh/m^2]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων										
May	2.63	June	8.96	July	0.04	August	-0.02	September	0.12	[Wh/m^2]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	551.23	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	539.50	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	11.73	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	2.13	%

Αποτελέσματα 10.2γ Αθήνα, νότιος προσανατολισμός, PCM 26

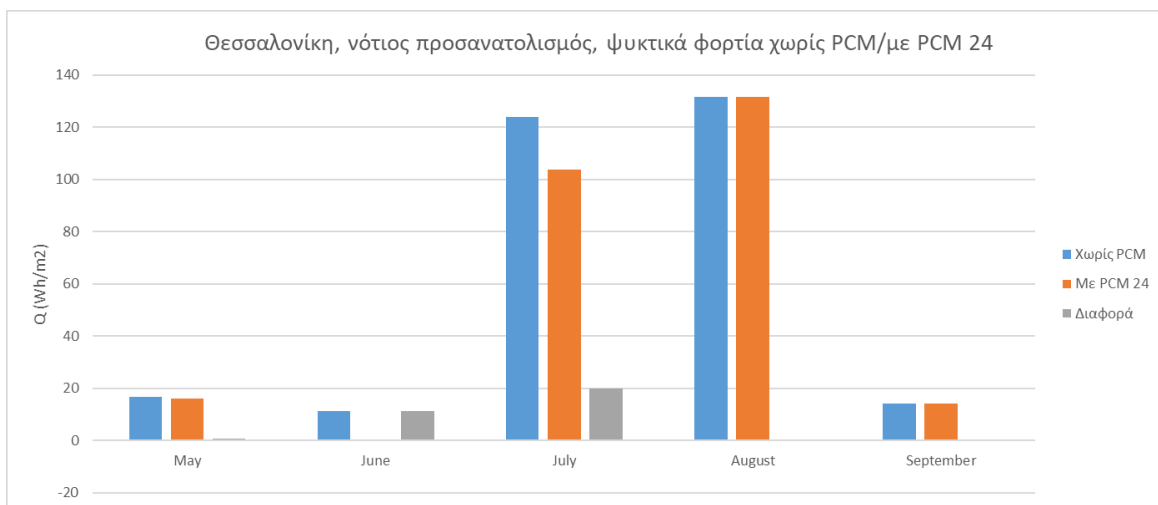
Υλικό γυψοσανίδας	Συνολικά ψυκτικά φορτία [Wh/m <sup>2</sup> ]	Ποσοστό κέρδους [%]
Χωρίς PCM	551,23	-
PCM 24	506,64	8,09
PCM 26	487,40	11,58
PCM 22	539,50	2,13

*Πίνακας 10.2α Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την επίδραση τύπου του ΥΑΦ (Αθήνα)*

Με τη χρήση του PCM 26 παρατηρούμε μείωση των ψυκτικών φορτίων σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, που χρησιμοποιήθηκε PCM 24. Αφού ως μέτρο σύγκρισης και για τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο στο οποίο δεν υφίσταται κάποιο ΥΑΦ, το ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων στην δεύτερη περίπτωση εμφανίζεται μεγαλύτερο.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι αν χρησιμοποιηθεί υλικό για το οποίο η αλλαγή φάσης συντελείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η επίδρασή του θα είναι αντίστοιχα πιο αισθητή για τις υψηλές θερμοκρασίες που προκύπτουν από τις εξωτερικές συνθήκες. Αυτό εξηγεί και την μεγαλύτερη επίδραση που είχε το PCM 24 στην πόλη της Αθήνας για την παραμετρικής μελέτη της προηγούμενης ενότητας.

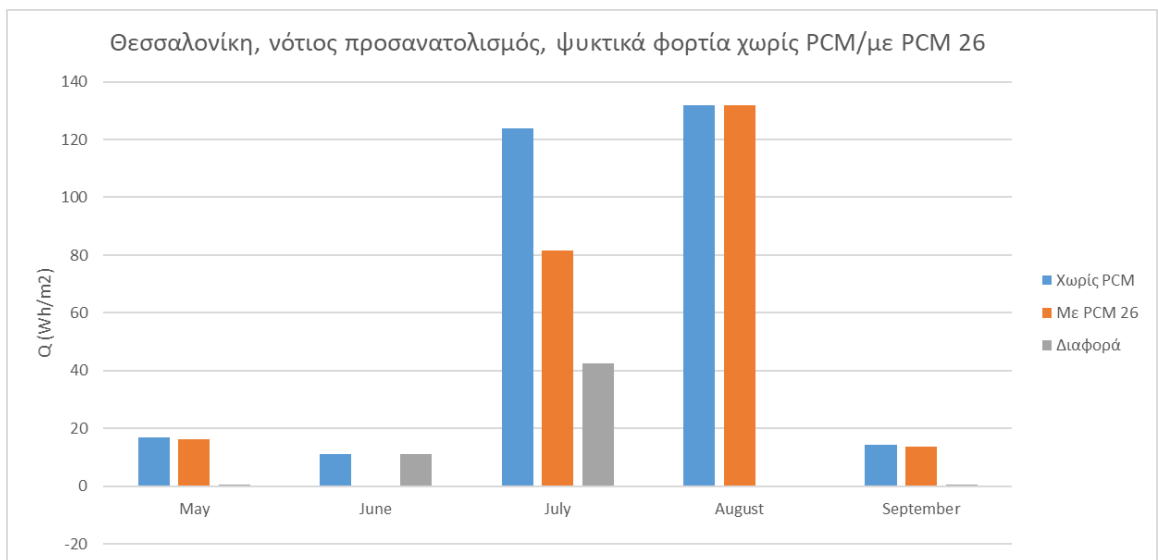
Με τη χρήση όμως του PCM 22, το κέρδος επί των ψυκτικών φορτίων ελαχιστοποιείται. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα παραπάνω, καθώς ένα υλικό το οποίο δρα ως μέσω αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, αναμένεται να έχει αντίστοιχα χαμηλότερη επίδραση σε ένα μοντέλο με τέτοιες προδιαγραφές.



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ										
May	16.88	June	11.16	July	123.93	August	131.69	September	14.20	[Wh/m^2]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ										
May	16.05	June	0.00	July	103.92	August	131.71	September	14.07	[Wh/m^2]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων										
May	0.83	June	11.16	July	20.01	August	-0.01	September	0.13	[Wh/m^2]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	297.87	[Wh/m²]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	265.75	[Wh/m²]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	32.12	[Wh/m²]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	10.78	%

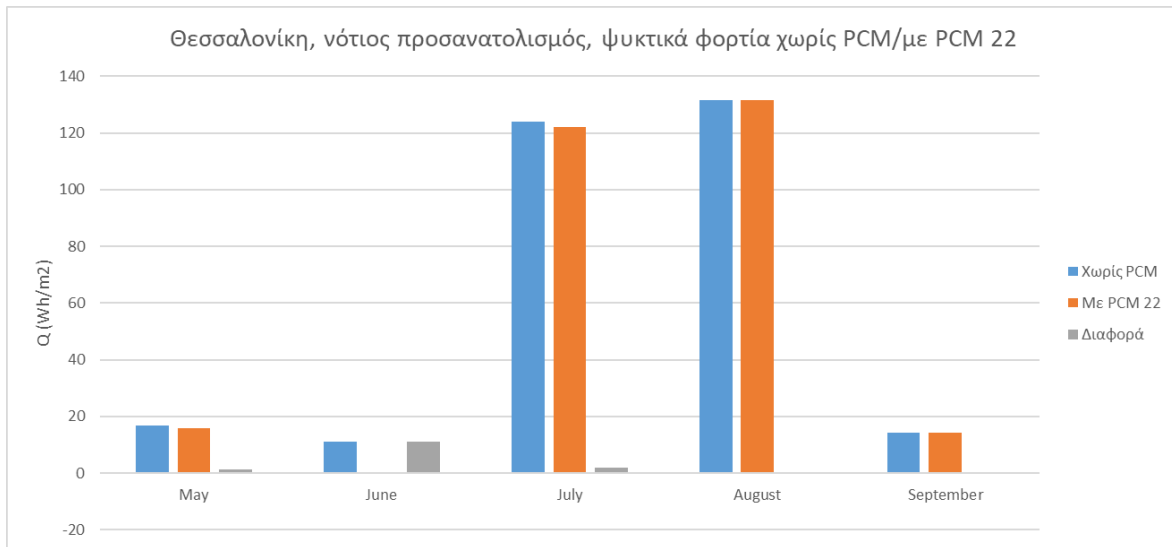
### Αποτελέσματα 10.2δ Θεσσαλονίκη, νότιος προσανατολισμός, PCM 24



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	16.87623	June	11.16427	July	123.9338	August	131.6941	September	14.20264 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	16.28948	June	0	July	81.54905	August	131.8167	September	13.64122 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	0.586751	June	11.16427	July	42.38478	August	-0.12266	September	0.561417 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	297.87	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	243.30	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	54.57	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	18.32	%

### Αποτελέσματα 10.2ε Θεσσαλονίκη, νότιος προσανατολισμός, PCM 26



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	16.88	June	11.16	July	123.93	August	131.69	September	14.20 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	15.71	June	0.00	July	122.14	August	131.70	September	14.14 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	1.16	June	11.16	July	1.79	August	-0.01	September	0.06 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	297.87	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	283.70	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	14.17	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	4.76	%

### Αποτελέσματα 10.2στ Θεσσαλονίκη, νότιος προσανατολισμός, PCM 22

Υλικό γυψοσανίδας	Συνολικά ψυκτικά φορτία [Wh/m <sup>2</sup> ]	Ποσοστό κέρδους [%]
Χωρίς PCM	297,87	-
PCM 24	265,75	10,78
PCM 26	243,30	18,32
PCM 22	283,70	4,76

*Πίνακας 10.28 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την επίδραση τύπου του ΥΑΦ (Θεσσαλονίκη)*

Για την περίπτωση της Θεσσαλονίκης, τα φορτία όπως ήταν αναμενόμενο εμφανίζονται πάλι κατά τους θερινούς μήνες. Λόγω του πιο ήπιου κλίματος της πόλης όμως, αυτά εμφανίζονται σαφώς μειωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα για την περίπτωση της Αθήνας. Το κλίμα αυτής της πόλης επίσης είναι τέτοιο, έτσι ώστε η επίδραση του ΥΑΦ να μην παρατηρείται μόνο κατά τον μήνα Ιούνιο, αλλά να παρατηρείται και κατά τον Ιούλιο. Εφόσον η εξωτερική θερμοκρασία καθυστερεί να υπερβεί τα όρια αλλαγής φάσης του υλικού, παρατηρείται αντίστοιχα πιο παρατεταμένη χρονικά επίδραση του ΥΑΦ, το οποίο προφανώς ενεργοποιήθηκε όταν το επέτρεψαν οι συνθήκες κάποια στιγμή τον Ιούνιο, και συνέχισε να έχει επίδραση στα φορτία και κατά τον επόμενο μήνα, όπου πάλι κάποια στιγμή, όπως εξηγήθηκε ήδη, παύει να εμφανίζεται κάποια επίδραση.

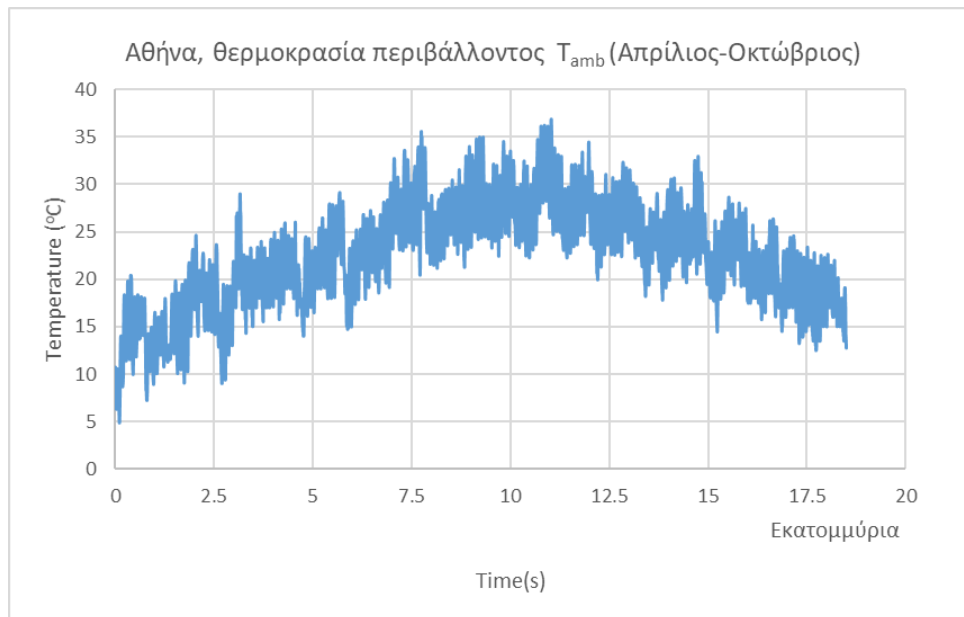
Με τη χρήση PCM 26 αντί του PCM 24, παρατηρείται η ίδια τάση αύξησης του ποσοστού κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων, ενώ με τη χρήση του PCM 22, ομοίως με τα αποτελέσματα για την πόλη της Αθήνας, το ποσοστό μειώνεται αισθητά.

### 10.3 Επίδραση Προσανατολισμού Τοιχώματος

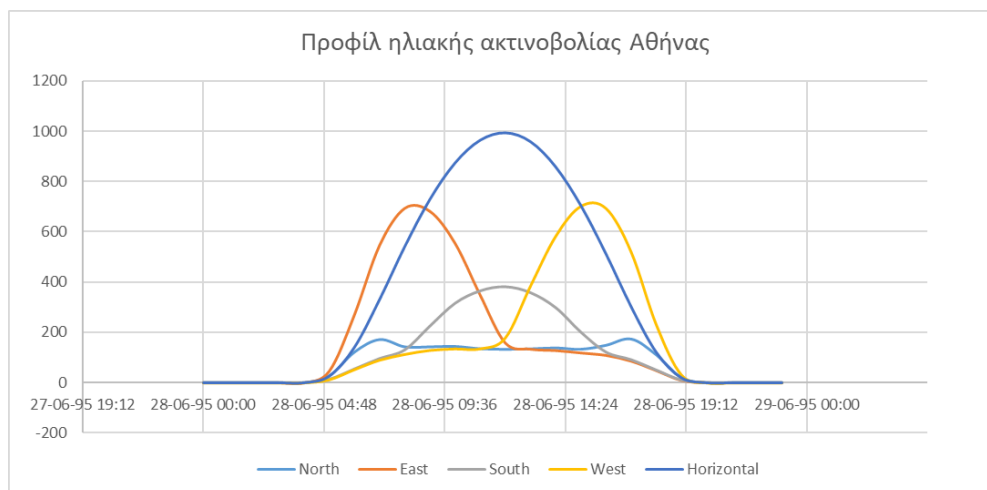
Υπενθυμίζεται η εξίσωση υπολογισμού της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας:

$$T_{eq}(t) = T_{amb}(t) + \frac{(a \cdot q_{sol}(t))}{h_{ext}} \quad (2)$$

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{amb}$ ) είναι η ίδια για κάθε περίπτωση προσανατολισμού, ενώ αυτό που διαφοροποιείται κάθε φορά είναι το επίπεδο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ( $q_{sol}$ ).

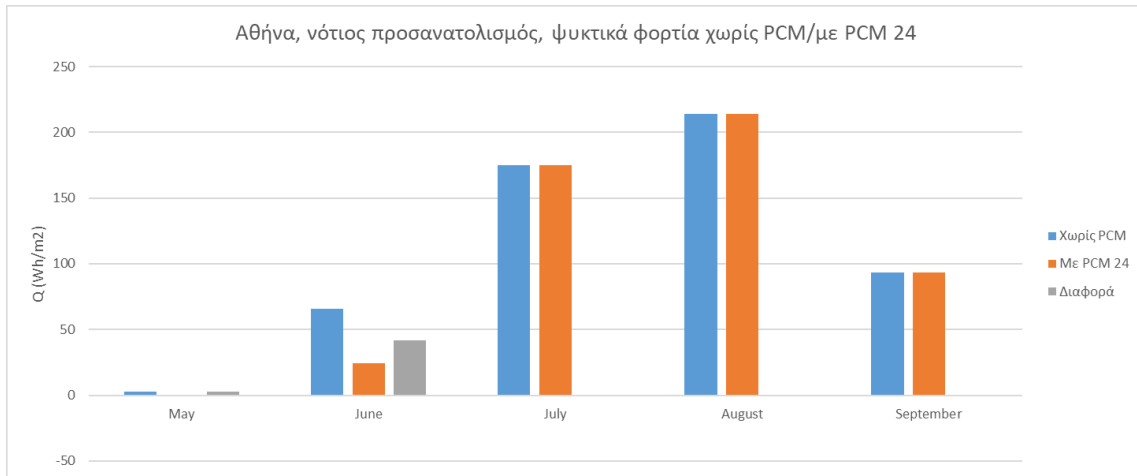


Γράφημα 10.3α Θερμοκρασία περιβάλλοντος Αθήνας



Γράφημα 10.3β Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, αναλόγως τον προσανατολισμό

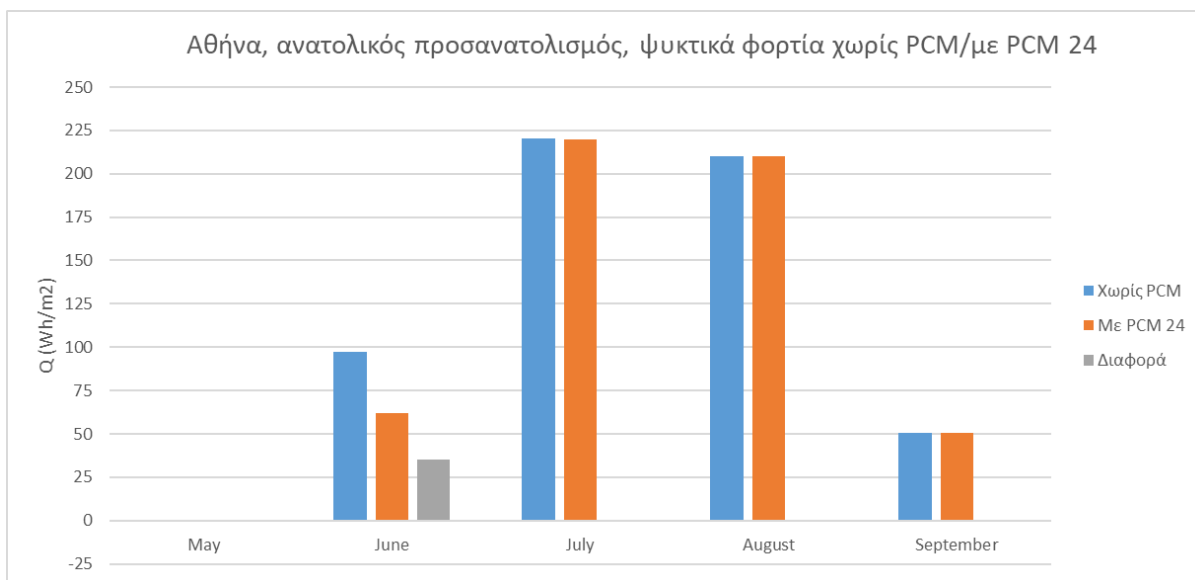
Για την εξέταση της επίδρασης του προσανατολισμού της τοιχοποιίας, δημιουργήθηκαν αρχεία για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας, όσοι και οι προσανατολισμοί. Θεωρήθηκε ΥΑΦ για την γυψοσανίδα το PCM 24, δε μελετάται η απόκριση δηλαδή του συστήματος για τα άλλα δύο υλικά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Εισάγοντας τα δεδομένα στο υπολογιστικό πρόγραμμα και με χρονική περίοδο πάλι τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο, για την πόλη της Αθήνας, προκύπτουν τα ακόλουθα:



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	2.63	June	65.75	July	175.19	August	214.26	September	93.39 [Wh/m²]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	0.00	June	24.06	July	175.12	August	214.29	September	93.17 [Wh/m²]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	2.63	June	41.69	July	0.07	August	-0.03	September	0.23 [Wh/m²]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	551.23	[Wh/m²]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	506.64	[Wh/m²]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	44.589	[Wh/m²]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	8.09	%

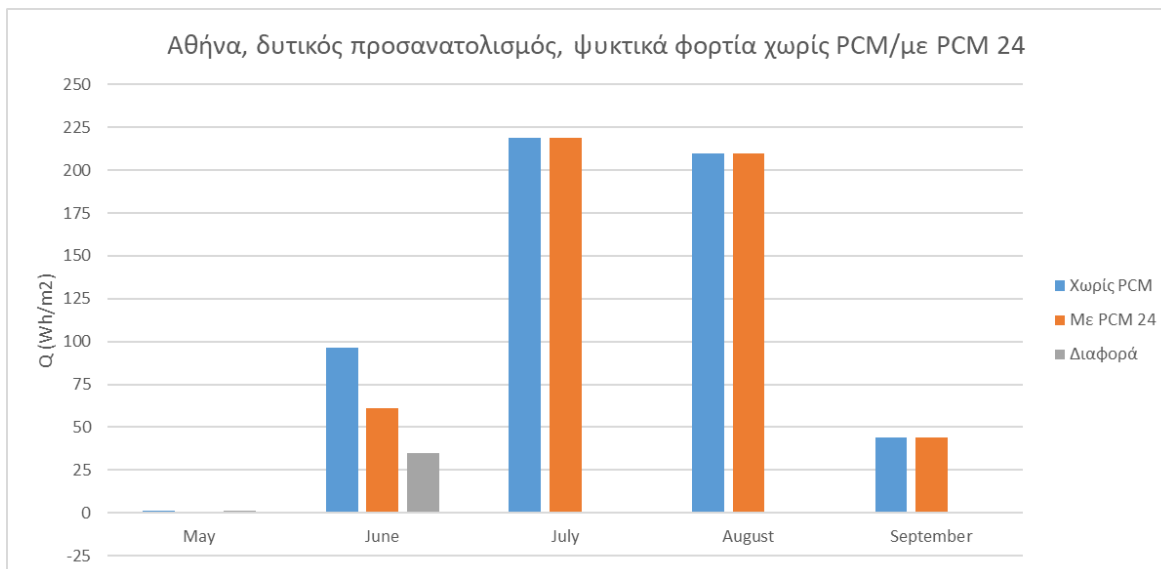
Αποτελέσματα 10.3α Αθήνα, νότιος προσανατολισμός, PCM 24



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	0.45	June	97.22	July	220.08	August	209.98	September	50.52 [Wh/m²]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	0.00	June	61.81	July	220.06	August	210.07	September	50.55 [Wh/m²]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	0.45	June	35.41	July	0.03	August	-0.08	September	-0.04 [Wh/m²]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	578.25 [Wh/m²]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	542.49 [Wh/m²]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	35.76 [Wh/m²]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	6.18 %

#### Αποτελέσματα 10.3β Αθήνα, ανατολικός προσανατολισμός, PCM 24

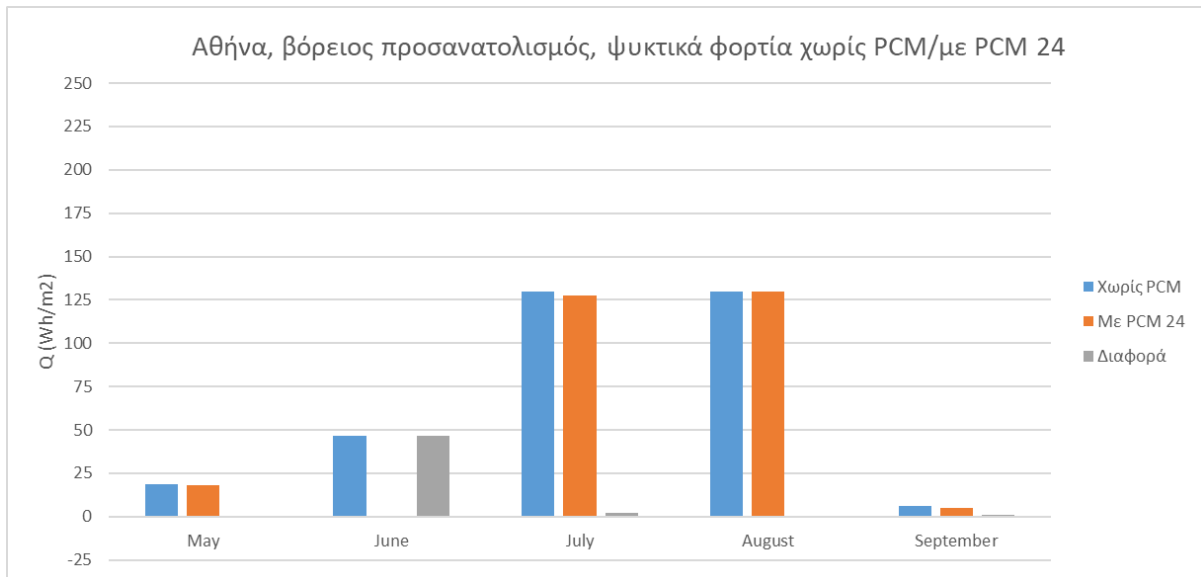




Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ										
May	1.23	June	96.44	July	218.70	August	209.78	September	43.94	[Wh/m^2]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ										
May	0.00	June	61.32	July	218.61	August	209.90	September	43.89	[Wh/m^2]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων										
May	1.23	June	35.12	July	0.09	August	-0.12	September	0.05	[Wh/m^2]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	570.09	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	533.72	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	36.37	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	6.38	%

*Αποτελέσματα 10.3γ Αθήνα, δυτικός προσανατολισμός, PCM 24*



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ										
May	18.50	June	46.54	July	129.54	August	129.66	September	5.98	[Wh/m^2]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ										
May	18.20	June	0.00	July	127.24	August	129.70	September	5.23	[Wh/m^2]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων										
May	0.30	June	46.54	July	2.30	August	-0.04	September	0.75	[Wh/m^2]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	330.23	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	280.37	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	49.86	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	15.10	%

*Αποτελέσματα 10.3γ Αθήνα, δυτικός προσανατολισμός, PCM 24*

Προσανατολισμός	Συνολικά ψυκτικά φορτία χωρίς PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	Συνολικά ψυκτικά φορτία με PCM 24 [Wh/m <sup>2</sup> ]	Συνολική μείωση ψυκτικών φορτίων (επίδραση PCM) [Wh/m <sup>2</sup> ]	Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων [%]
Νότιος	551,23	506,84	44,36	8,09
Ανατολικός	578,25	542,49	35,76	6,18
Δυτικός	570,09	533,72	36,37	6,38
Βόρειος	330,23	280,37	49,86	15,10

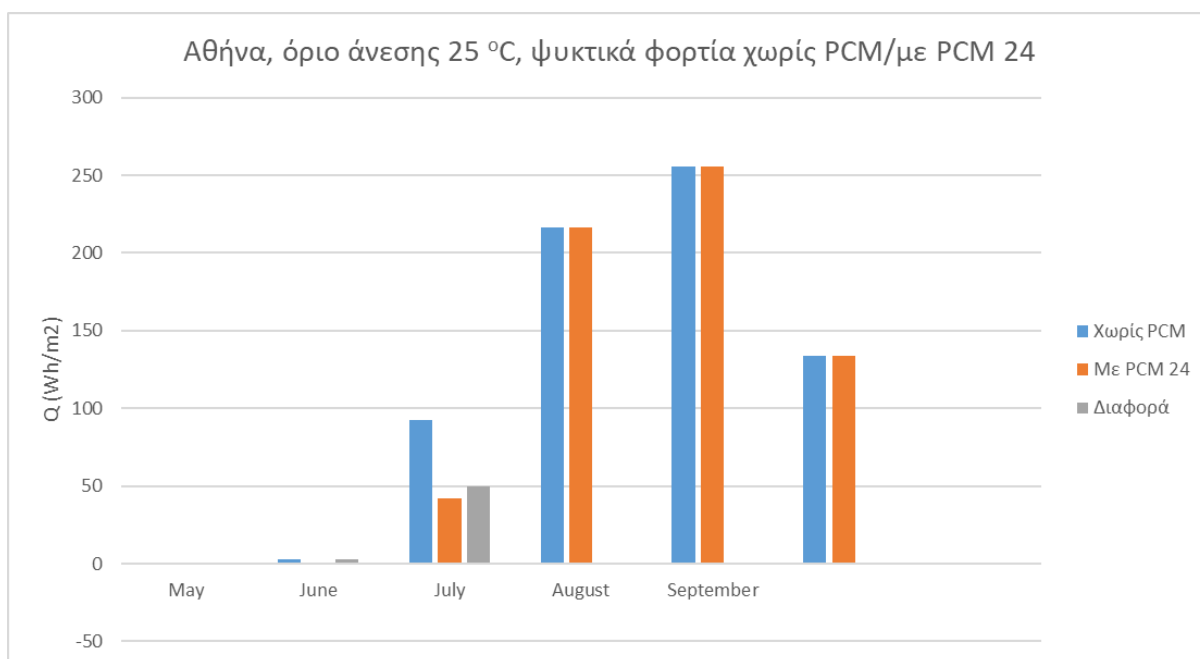
*Πίνακας 10.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλους τους προσανατολισμούς (Αθήνα)*

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα επίπεδα των εν δυνάμει ψυκτικών φορτίων είναι αναμενόμενα μεγαλύτερα για το νότιο, το ανατολικό και το δυτικό τοίχωμα από αυτά για το βόρειο. Η επίδραση του ΥΑΦ στα εν δυνάμει ψυκτικά φορτία είναι παραπλήσια για το δυτικό και το ανατολικό τοίχωμα.

Η επίδραση του ΥΑΦ εμφανίζεται ελάχιστα σημαντικότερη για το τοίχωμα βόρειο προσανατολισμού. Αυτό ίσως οφείλεται στις θερμοκρασίες όπως προκύπτουν από τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου για τις μετεωρολογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με τα χαμηλά επίπεδα των φορτίων, για τα οποία λόγω αριθμητικής το ποσοστό επίδρασης εμφανίζεται σαφώς μεγαλύτερο από τους υπόλοιπους προσανατολισμούς.

## 10.4 Επίδραση Ορίου Θερμικής Άνεσης

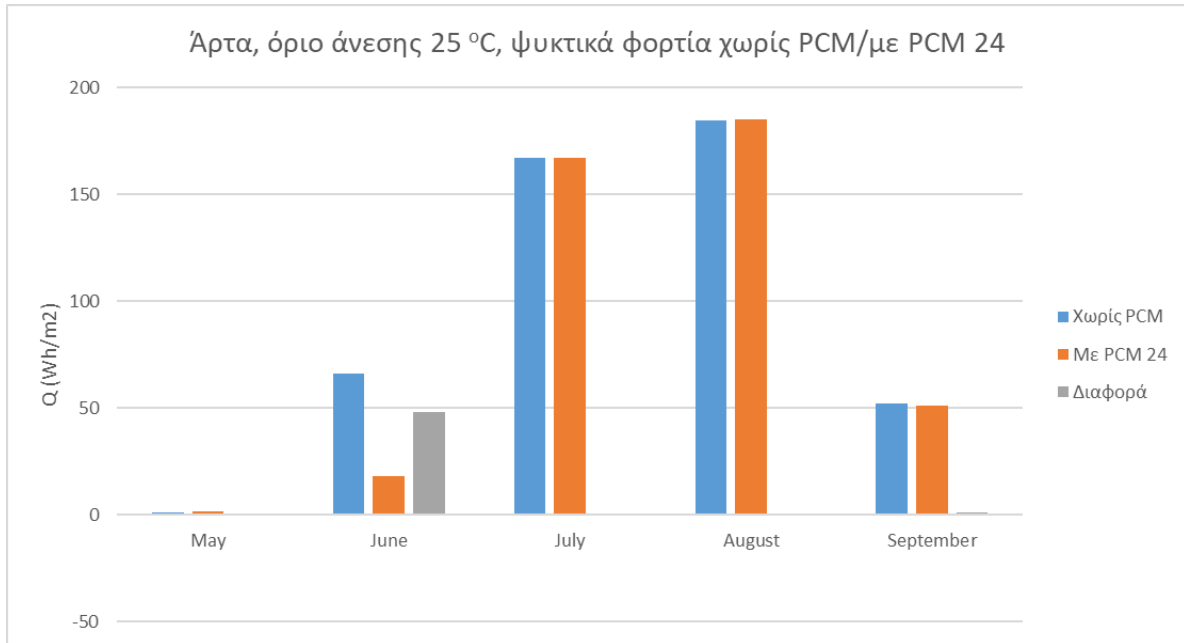
Για το αρχικό μοντέλο, το άνω όριο της θερμικής άνεσης για την οριοθέτηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα ορίστηκε στους 26 °C. Σε αυτήν την προσομοίωση, η θερμοκρασία αυτή ορίστηκε στους 25 °C, έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα στην περίπτωση που πρέπει να εφαρμοστεί μία πιο απαιτητική ζώνη θερμικής άνεσης. Με σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τοίχωμα νότιου προσανατολισμού για μετεωρολογικές συνθήκες και των τριών πόλεων είναι τα εξής:



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	2.63	June	92.23	July	216.63	August	255.69	September	133.81 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	0.00	June	42.20	July	216.49	August	255.79	September	133.69 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	2.63	June	50.03	July	0.13	August	-0.09	September	0.13 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	701.00	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	648.16	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	52.84	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	7.54	%

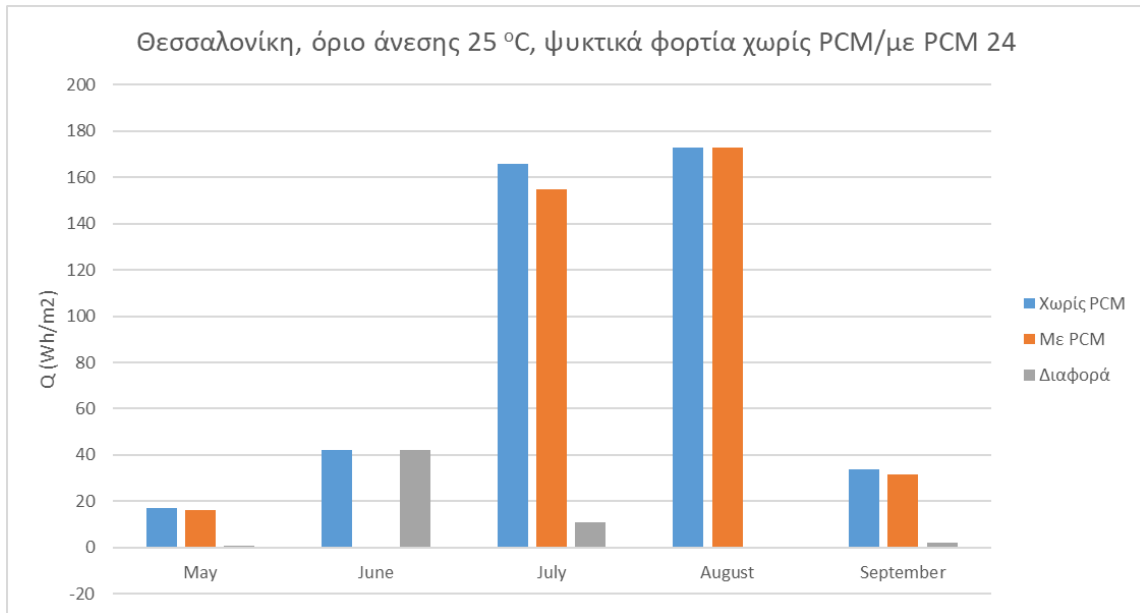
Αποτελέσματα 10.4α Αθήνα, νότιος προσανατολισμός, όριο 25 °C, PCM 24



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	0.98	June	65.94	July	167.19	August	184.70	September	51.94 [Wh/m²]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	1.34	June	18.07	July	166.89	August	184.84	September	51.18 [Wh/m²]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	-0.36	June	47.87	July	0.30	August	-0.14	September	0.76 [Wh/m²]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	470.75	[Wh/m²]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	422.32	[Wh/m²]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	48.43	[Wh/m²]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	10.29	%

Αποτελέσματα 10.4β Άρτα, νότιος προσανατολισμός, όριο 25 °C, PCM 24



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	16.88	June	42.21	July	165.68	August	172.92	September	33.62 [Wh/m^2]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	16.05	June	0.00	July	154.84	August	173.07	September	31.67 [Wh/m^2]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	0.83	June	42.21	July	10.84	August	-0.15	September	1.96 [Wh/m^2]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	431.31	[Wh/m^2]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	375.62	[Wh/m^2]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	55.69	[Wh/m^2]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	12.91	%

Αποτελέσματα 10.4γ Θεσσαλονίκη, νότιος προσανατολισμός, όριο 25 °C, PCM 24

Όριο άνεσης 26 °C			
	Αθήνα	Άρτα	Θεσσαλονίκη
Φορτία χωρίς PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	551,22	339,63	297,87
Φορτία με PCM 24 [Wh/m <sup>2</sup> ]	506,63	300,98	265,75
Επίδραση PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	45,19	38,65	32,12
Ποσοστό κέρδους [%]	8,09	11,38	10,78
Όριο άνεσης 25 °C			
	Αθήνα	Άρτα	Θεσσαλονίκη
Φορτία χωρίς PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	701,00	470,75	431,31
Φορτία με PCM 24 [Wh/m <sup>2</sup> ]	648,16	422,32	375,62
Επίδραση PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	52,84	48,43	55,69
Ποσοστό κέρδους [%]	7,54	10,29	12,91
Διαφορά επίδρασης PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	7,65	9,78	23,57

*Πίνακας 10.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα φορτιών για διαφορετικό όριο άνεσης*

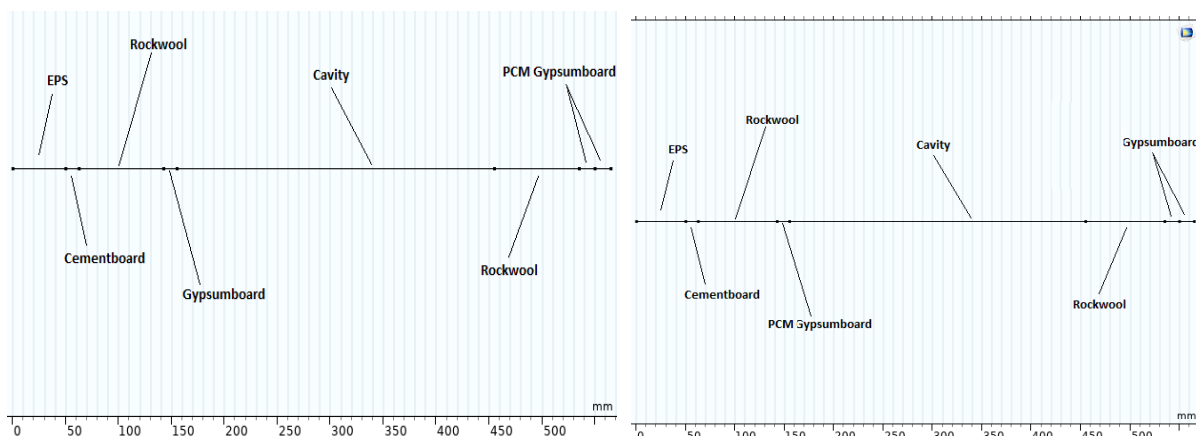
Όπως ήταν αναμενόμενο, αυτό που προκύπτει και από τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις είναι ότι τα συνολικά εν δυνάμει ψυκτικά φορτία είναι αυξημένα για το χαμηλότερο όριο άνεσης. Είναι λογικό πως όταν ορίζεται χαμηλότερο όριο άνεσης, αυξάνονται και οι απαιτήσεις για τα ψυκτικά φορτία.

Για την τελευταία γραμμή του Πίνακα 10.4, υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της επίδρασης του PCM για όριο άνεσης 26 °C και αυτής για όριο 25 °C. Αυτό που προκύπτει είναι ότι, με όριο άνεσης στους 25 °C παρατηρείται σταδιακή βελτίωσή της επίδρασης καθώς παρατηρούμε τα αποτελέσματα από την πόλη με το θερμότερο κλίμα προς την πόλη με το ψυχρότερο. Μάλιστα για την πόλη της Θεσσαλονίκης η επίδραση εμφανίζεται μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις.

## 10.5 Επίδραση Θέσης Γυψοσανίδας ΥΑΦ

Για την συγκεκριμένη τοιχοποιία, επειδή είναι αυστηρά καθορισμένη και κατασκευάστηκε και μελετήθηκε με δεδομένη την αλληλουχία των στρωμάτων των υλικών, μία επέμβαση σε αυτή δεν κρίνεται εύκολη. Με την αντιμετάθεση κάποιων στρωμάτων υλικών ή την αλλαγή των ιδιοτήτων τους, τροποποιούνται οι ιδιότητες της τοιχοποιίας και η απόκριση της στις εξωτερικές συνθήκες. Ζητούμενο παραμένει η αναζήτηση της θέσης του ΥΑΦ μέσα στην τοιχοποιία, έτσι ώστε αυτό να λειτουργεί βέλτιστα. Πολλές έρευνες έχουν αποφανθεί ότι βέλτιστα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν αυτό βρίσκεται στο τέλος της τοιχοποιίας, όταν αποτελεί δηλαδή το στρώμα που έρχεται σε επαφή με τον εσωτερικό χώρο.

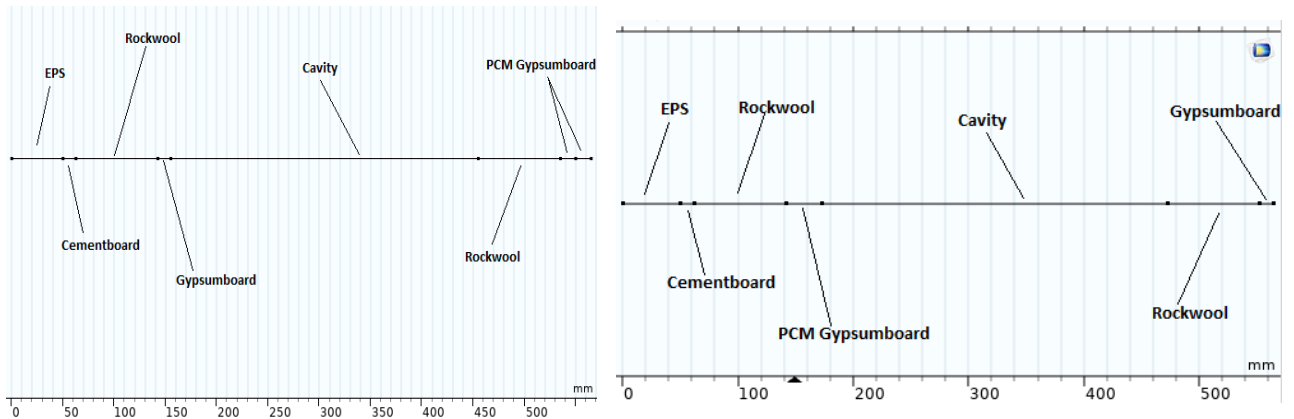
Ως μία πρώτη προσέγγιση, κρίθηκε προτιμότερο για το υπολογιστικό μοντέλο, να αντιμετωπιστούν οι θέσεις της απλής γυψοσανίδας και των δύο γυψοσανίδων ΥΑΦ, καθώς τα στρώματα αυτά έχουν παραπλήσιες φυσικές και θερμικές ιδιότητες, διατηρώντας τη γεωμετρία της τοιχοποιίας.



Εικόνα 10.5α Το αρχικό μοντέλο της τοιχοποιίας (αριστερά) και το νέο μοντέλο με την εναλλαγή θέσης των γυψοσανίδων (δεξιά)

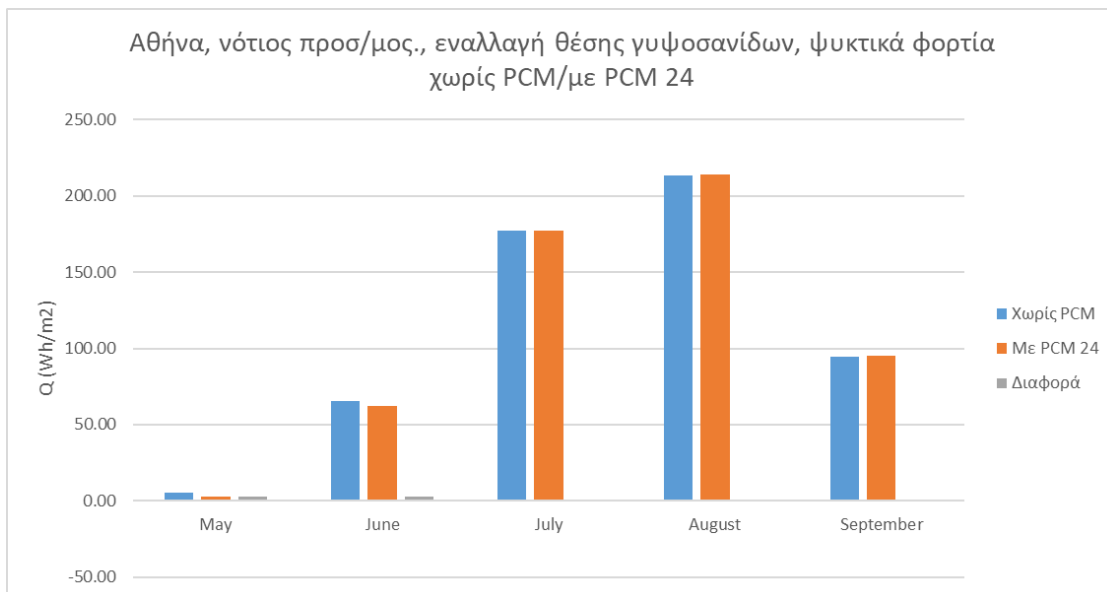
Υπενθυμίζεται ότι για το αρχικό μοντέλο της τοιχοποιίας, το στρώμα της απλής γυψοσανίδας είχε πάχος 12,5 mm, ενώ το στρώμα της γυψοσανίδας ΥΑΦ 30 mm. Οπότε πλέον το στρώμα της τοιχοποιίας με το ΥΑΦ είχε πάχος 12,5 mm και βρισκόταν πριν το διάκενο αέρα. Η παραπάνω μετατροπή εφαρμόστηκε στα υπολογιστικά μοντέλα του τοιχώματος νότιου προσανατολισμού και τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ελαχιστοποίηση της επίδρασης του ΥΑΦ (διαφορές της τάξης του 0,5-1% στα ψυκτικά φορτία). Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί ίσως από το μικρό πάχος που ορίστηκε πλέον για τη γυψοσανίδα ΥΑΦ, το οποίο ελαχιστοποίησε την επίδραση του υλικού στα ψυκτικά φορτία.

Για να εξακριβωθεί αν το πάχος του στρώματος του ΥΑΦ ήταν καθοριστικό για την παραπάνω έκβαση, δημιουργήθηκαν νέα μοντέλα αλλαγής θέσης, στα οποία πάλι γίνεται αντιμετάθεση των θέσεων των γυψοσανίδων, διατηρώντας όμως σταθερό το πάχος τους. Από τη γεωμετρία της τοιχοποιίας αυτό που παραμένει σταθερό δηλαδή είναι το συνολικό της πάχος, ενώ η γυψοσανίδα ΥΑΦ πλέον βρίσκεται πριν το διάκενο αέρα και θεωρήθηκε ότι αποτελεί ένα ενιαίο στρώμα πάχους 30 mm.



*Εικόνα 10.5b Το αρχικό μοντέλο της τοιχοποιίας (αριστερά) και το τελικό μοντέλο με την εναλλαγή θέσης των γυψοσανίδων σταθερού πάχους (δεξιά)*

Οι παραπάνω μετατροπές της γεωμετρίας εφαρμόστηκαν στα υπολογιστικά μοντέλα της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης και τα αποτελέσματα ακολουθούν:

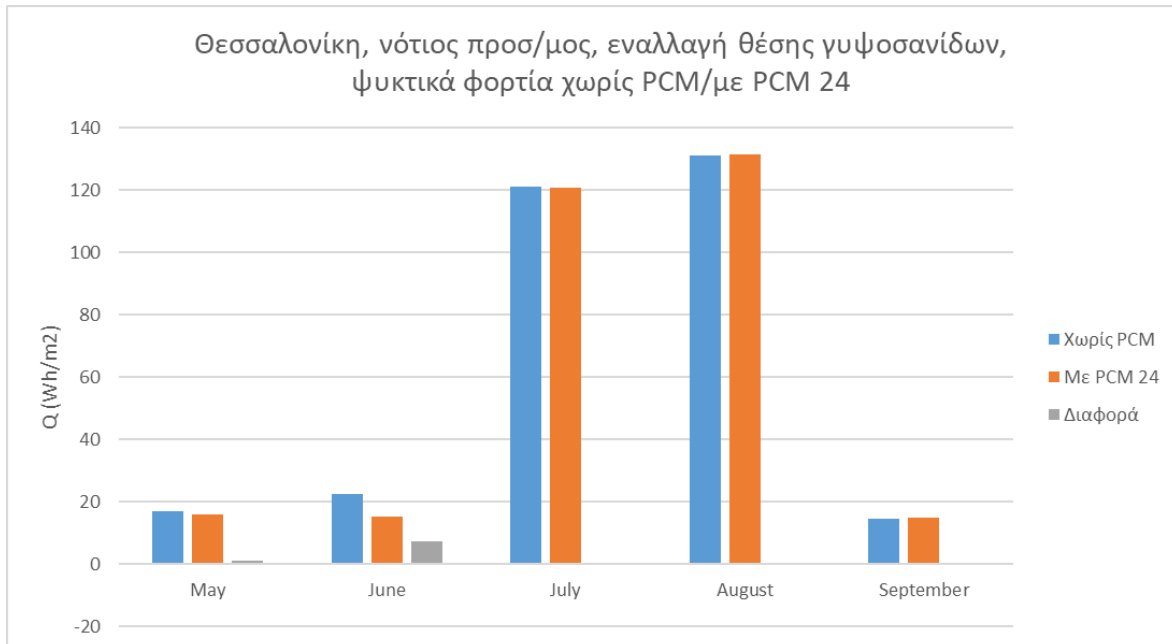




Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	5.62	June	65.30	July	177.12	August	213.45	September	94.75 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	3.07	June	62.29	July	177.40	August	213.94	September	95.28 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	2.55	June	3.00	July	-0.28	August	-0.49	September	-0.52 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	556.24	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	551.98	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	4.26	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	0.77	%

*Αποτελέσματα 10.5α Αθήνα, νότιος προσ/μός, αλλαγή θέσης, PCM 24*



Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ									
May	16.99	June	22.53	July	121.09	August	131.23	September	14.60 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Μηνιαίο άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ									
May	15.94	June	15.37	July	120.73	August	131.24	September	14.94 [Wh/m <sup>2</sup> ]
Διαφορά των ανωτέρω αθροισμάτων									
May	1.04	June	7.16	July	0.35	August	-0.01	September	-0.34 [Wh/m <sup>2</sup> ]

Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	306.44	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	298.23	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	8.21	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	2.68	%

*Αποτελέσματα 10.5β Θεσσαλονίκη, νότιος προσ/μός, αλλαγή θέσης, PCM 24*

Πόλη	Συνολικά ψυκτικά φορτία χωρίς PCM [Wh/m <sup>2</sup> ]	Συνολικά ψυκτικά φορτία με PCM 24 [Wh/m <sup>2</sup> ]	Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων [%]
Αρχικό Μοντέλο			
Αθήνα	551,23	506,64	8,09%
Θεσσαλονίκη	297,87	265,75	11,38%
Μοντέλο Αλλαγής Θέσης			
Αθήνα	556,24	551,98	0,77%
Θεσσαλονίκη	306,44	298,23	2,68%

Πίνακας 10.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων για την επίδραση της θέσης του ΥΑΦ

Αυτό που προκύπτει από τα αποτελέσματα είναι ότι η επίδραση του ΥΑΦ ελαχιστοποιείται με αυτήν την αλλαγή θέσης.



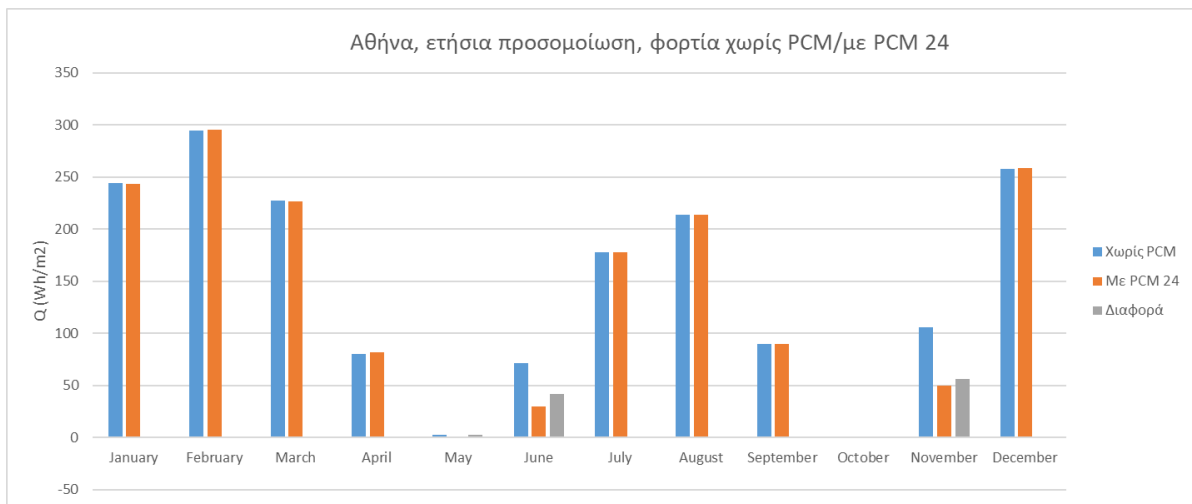
Γράφημα 10.5 Η θερμοκρασία όπως προέκυψε από του υπολογισμούς για το σημείο πριν την γυψοσανίδα ΥΑΦ για τα δύο μοντέλα γεωμετρίας

Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το παραπάνω γράφημα, καθώς φαίνεται ότι η περίοδος δράσης του ΥΑΦ για το μοντέλο αλλαγής θέσης είναι πιο περιορισμένη, οπότε και η επίδρασή του στα εν δυνάμει ψυκτικά φορτία είναι αντίστοιχα πιο μικρή σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.

# 11

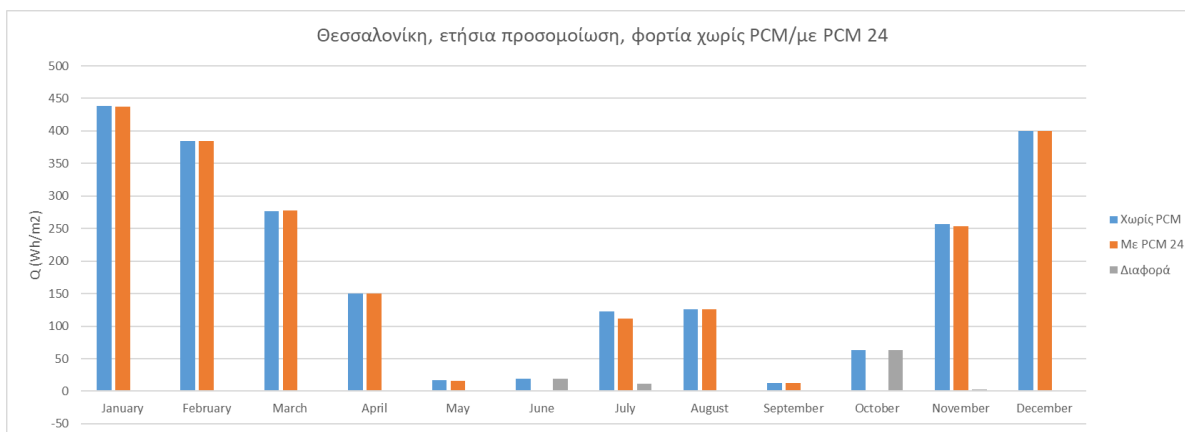
## Ετήσιες Υπολογιστικές Προσομοιώσεις

Έτσι ώστε να αποδοθεί μία ολοκληρωμένη εικόνα για την επίδραση του ΥΑΦ στα φορτία θερμότητας προς το εσωτερικό περιβάλλον, κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν ετήσιες προσομοιώσεις. Χρησιμοποιήθηκαν, λοιπόν, όλα τα μετεωρολογικά δεδομένα για τη δημιουργία ετήσιων ισοδύναμων εξωτερικών θερμοκρασιών για δύο πόλεις, εντάχθηκαν στα αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα τοιχωμάτων νότιου προσανατολισμού και ορίστηκε τέτοιος επιλύτης ώστε η χρονική περίοδος των υπολογισμών να είναι ένα έτος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς ακολουθούν:



Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	555.12	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	510.55	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	44.57	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	8.03	%
Συνολικό άθροισμα θερμικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	1210.42	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα θερμικών φορτίων με ΥΑΦ=	1155.19	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα θερμικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	55.23	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των θερμικών φορτίων=	4.56	%

Αποτελέσματα 11.α Αθήνα, ετήσια προσομοίωση, PCM 24



Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	297.87	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα ψυκτικών φορτίων με ΥΑΦ=	265.75	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα ψυκτικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	32.12	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων=	10.78	%
Συνολικό άθροισμα θερμικών φορτίων χωρίς ΥΑΦ=	1969.20	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό άθροισμα θερμικών φορτίων με ΥΑΦ=	1903.73	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Συνολικό κέρδος στα θερμικά φορτία λόγω χρήσης ΥΑΦ=	65.47	[Wh/m <sup>2</sup> ]
Ποσοστό κέρδους επί των θερμικών φορτίων=	3.32	%

#### Αποτελέσματα 11.β Θεσσαλονίκη, ετήσια προσομοίωση, PCM 24

Η περίοδος από τον μήνα Μάιο έως και τον Σεπτέμβριο θεωρήθηκε πάλι ότι είναι η περίοδος εμφάνισης ψυκτικών φορτίων, ενώ θεωρήθηκε ότι στους υπόλοιπους μήνες εμφανίζονται θερμικά φορτία.

Για την περίπτωση της Αθήνας, το ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων προέκυψε ίσο με 8,03%. Το κέρδος, όπως εξηγήθηκε στην πρώτη ενότητα παρουσίασης των αποτελεσμάτων συγκεντρώνεται κυρίως τον μήνα Ιούνιο.

Το ποσοστό κέρδους επί των θερμικών φορτίων προέκυψε ίσο με 4,56%. Το κέρδος αυτό εμφανίζεται μόνο κατά τον μήνα Νοέμβριο. Προφανώς, οι εξωτερικές συνθήκες της πόλης και έτσι όπως έχει οριστεί το μοντέλο δίχως αερισμό ή κλιματισμό στο εσωτερικό, θέτουν σε επαναλειτουργία το ΥΑΦ αυτή την περίοδο. Την περίοδο δηλαδή που οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούσαν τους προηγούμενους πιο θερμούς μήνες, ολοένα και μειώνονται και κάποια στιγμή λαμβάνουν τιμές πάλι εντός των ορίων των θερμοκρασιών αλλαγής φάσης του υλικού.

Για την περίπτωση της Θεσσαλονίκης, το ποσοστό κέρδους επί των ψυκτικών φορτίων προέκυψε ίσο με 10,78%, ενώ το ποσοστό κέρδους επί των θερμικών φορτίων προέκυψε ίσο με 3,32%. Παρατηρούμε ότι κέρδος τώρα εμφανίζεται κατά τον μήνα Οκτώβριο,

καθώς οι εξωτερικές συνθήκες αυτής της πόλης προκαλούν πτώση της θερμοκρασίας νωρίτερα σε σχέση με αυτές της Αθήνας.

Γενικά, το κέρδος επί των θερμικών φορτίων εμφανίζεται αρκετά μικρότερο σε σχέση με αυτό επί των ψυκτικών. Αυτό εξηγείται από τη φύση του επιλεγμένου ΥΑΦ, το οποίο δρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Για την χώρα μας, άλλωστε, αυτό είναι το ζητούμενο, καθώς παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανάγκη μείωσης των φορτίων κατά τους θερμούς μήνες, παρά μείωσης τους κατά τους χειμερινούς.

# 12

## Συμπεράσματα – Σχόλια – Προτάσεις για Μελλοντικές Έρευνες

Αρχικά, δημιουργήθηκε υπολογιστικό μοντέλο πιστοποίησης πειραματικών αποτελεσμάτων με τη χρήση του λογισμικού Comsol Multiphysics. Ζητούμενο ήταν η εξακρίβωση της ικανότητας ενός τέτοιου μοντέλου να αποδίδει αποτελέσματα συναφή με πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια άλλων ερευνών για πιλοτική κατοικία στην Ελλάδα.

Από αυτό, προέκυψε ότι η προσομοίωση τοιχοποιίας στο υπολογιστικό πρόγραμμα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε, πρέπει να σημειωθεί, ότι έγινε σε επίπεδο δομικού υλικού και όχι σε επίπεδο ολόκληρης κατοικίας ή κατασκευής (με παράθυρα, οροφή, δάπεδο κ.ά.).

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε υπολογιστικό μοντέλο προσομοιώσεων, ώστε να πραγματοποιηθούν παραμετρικές προσομοιώσεις για την μελέτη της επίδρασης ΥΑΦ στην τοιχοποιία.

Από αυτές τις προσομοιώσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Α) Η χρήση γυψοσανίδων ΥΑΦ έναντι απλών γυψοσανίδων στην τοιχοποιία επιφέρει γενικά μείωση των εν δυνάμει φορτίων.

Β) Η χρήση διαφορετικού τύπου ΥΑΦ, επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα αναλόγως το υλικού που επιλέγεται, τις συνθήκες του προβλήματος και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Γ) Για τοιχώματα διαφορετικού προσανατολισμού παρατηρήθηκε η αναμενόμενη διαφοροποίηση στα ψυκτικά φορτία τους, αναλόγως με το επίπεδο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Δ) Με τον ορισμό διαφορετικού, χαμηλότερου ορίου θερμικής άνεσης, τα ψυκτικά φορτία αυξάνονται, ενώ η επίδραση του ΥΑΦ παραμένει εμφανής.

Ε) Η επιλογή τοποθέτησης του ΥΑΦ σε διαφορετικό στρώμα της τοιχοποιίας έχει επίπτωση στα φορτία και την επίδρασή του.

ΣΤ) Όταν το φαινόμενο της επίδρασης του ΥΑΦ παρατηρηθεί για την περίοδο ενός ολόκληρου έτους, γίνεται ακόμα πιο προφανής η επίπτωση που έχει η επιλογή υλικών με υψηλό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας στα ψυκτικά φορτία, έναντι των θερμικών.

Όσο αφορά τη δυνατότητα πραγματοποίησης περεταίρω έρευνας για τα παραπάνω, προτείνεται η ανάπτυξη πιο αναλυτικού μοντέλου προσομοιώσεων. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει από μονοδιάστατο, το πρόβλημα να γίνει δισδιάστατο ή και τρισδιάστατο, έτσι ώστε να ενταχθούν στο μοντέλο όλα εκείνα τα στοιχεία της κατασκευής που δεν λήφθηκαν υπόψη στη διενέργεια των υπολογισμών. Τέτοια είναι η ύπαρξη παραθύρων, δαπέδων και οροφής, καθώς και η προσομοίωση του φυσικού αερισμού, της ανθρώπινης δραστηριότητας και συστημάτων ενέργειας που μπορούν να απαντηθούν σε μία κατοικία.

Τέλος, αφού βρεθεί το κέρδος σε κάποια παραμετρική μελέτη, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία οικονομική μελέτη, η οποία να λαμβάνει υπόψη το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης των ΥΑΦ και την απόσβεση από τη χρήση τους, λόγω μείωσης των δαπανών σε ενεργειακές ανάγκες που μπορεί αυτή να επιφέρει.

# 10

## Βιβλιογραφία

- [1] A. W. Cosby, *Children of the Sun: a history of humanity's unappeasable appetite*, New York: W. W. Norton & Company, Inc., 500 Fifth Avenue, New York, NY 10110, 2006.
- [2] "www.wikipedia.com," [Online].
- [3] CrashCourse, "Humans and Energy: Crash Course World History 207," 2014. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=EM1lylyr-Zc>.
- [4] B. Viswanathan, *Energy Sources: Fundamentals of Chemical Conversion Processes and Applications*, John Fedor, Elsevier, 2017.
- [5] "Ορυκτές πρώτες ύλες της Ελλάδας," [Online]. Available: <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/energeiaka-orykta>.
- [6] "Ορυκτές πρώτες ύλες της Ελλάδας, Ενεργειακά Ορυκτά," [Online]. Available: <http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/energeiaka-orykta>.
- [7] ΔΕΗ, *Εξορύσσοντας το φως, μνήμες και εικόνες από λιγνίτη*, Αθήνα, Απρίλιος 2010.
- [8] Eurostat. [Online]. Available: [ec.europa.eu/eurostat](http://ec.europa.eu/eurostat).
- [9] History.com.Editors, "Energy Crisis (1970s)," 2010. [Online]. Available: [www.history.com/topics/1970s/energy-crisis](http://www.history.com/topics/1970s/energy-crisis).
- [10] G. Tverberg, "World Energy Consumption Since 1820 in Charts," 2012. [Online].
- [11] V. Smil, in *Energy Transitions: History, Requirements and Prospects*, Santa Barbara, California, ABC-CLIO, LLC, 2010.
- [12] BP, "Statistical Review of World Energy," [Online]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [13] R. A. Huggins, *Energy Storage*, Springer Science+Business Media, 2010.
- [14] G. F. Barker, *A Text-book of Elementary Chemistry, Theoretical and Inorganic*, New Haven, Conn.: Charles C. Chatfield & Co., 1874.



- [15] G. Jaeger, The Ehrenfest Classification of Phase Transitions: Introduction and Evolution, Springer-Verlag, 1998.
- [16] Various authors, Phase Transitions and Critical Phenomena, Vol. 1, 1972.
- [17] R. G. Anderson, "Britannica, Joseph Black, British Scientist," [Online]. Available: <https://www.britannica.com/biography/Joseph-Black>.
- [18] J. Noel, S. Kahwaji, L. Desgrosseilliers, D. Groulx and M.-A. White, "Phase Change Materials," Dalhouse University, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- [19] M. Rathod and J. Banerjee, "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review," Department of Mechanical Engineering, S.V. National Institute of Technology, India, 2012.
- [20] M. Rathod, "Phase Change Materials and Their Applications," 10.5772/intechopen.75923, 2018.
- [21] Σ. Λιοδάκης, Δ. Γάκης, Δ. Θεοδωρόπουλος, Π. Θεοδωρόπουλος και Α. Κάλλης, Χημεία Β' Γενικού Λυκείου, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο.
- [22] A. Abhat, "Low Temperature latent heat thermal energy storage walls," 30(4):313-31, 1983.
- [23] M. Hadjieva, S. Kanev and J. Arginov, "Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage," Central Laboratory of Solar Energy and New Energy Sources, Sofia, Bulgaria, 1991.
- [24] A. Shukla, D. Buddhi and R. Sawhney, "Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials," Thermal Energy Storage Laboratory, School of Energy and Environmental Studies, India, 2008.
- [25] C. Alkan, K. Kaya and A. Sari, "Preparation, Thermal properties and thermal reliability of form-stable paraffin/polypropylene composite for thermal energy storage," Journal of Polymers and the Environment; 17:254-8, 2009.
- [26] A. Abhat and N. Malatidis, "Determination of properties of heat of fusion storage materials for low temperature applications," First IEA conference on new energy conservation technologies and their commercialisation, Berlin, FRG: Springer, 1981.
- [27] A. Hasan and A. Sayigh, "Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials," Renewable Energy 1994; 4(1):69-76.
- [28] A. Sari, "Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for thermal energy storage," Materials Chemistry and Physics 2008; 109:459-64.

- [29] X. Ning, Z. Huang, Z. Luo, X. Gao, Y. Fang and Z. Zhang, "Inorganic Salt Hydrate for Thermal Energy Storage," Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, China, 2017.
- [30] Ε. Μαχαίρα, «Διπλωματική Εργασία: Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης PCM,» Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, Αθήνα, 2010.
- [31] "Technical applications of PCMs," [Online]. Available: [www.pcm-ral.org/pcm/en/pcm/pcm-application-areas/technical-applications/](http://www.pcm-ral.org/pcm/en/pcm/pcm-application-areas/technical-applications/).
- [32] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang and H. Di, "Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook," Tsinghua University, Beijing, China, 2006; 42 (2007) 2197-2209.
- [33] P. Schossig, H. Henning, S. Gschwander and T. Haussmann, "Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials," Solar Energy Materials and Solar Cells 2005;89(2-3):297-306.
- [34] A. Khudhair and M. Farid, "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials," University of Auckland, New Zealand, 2004;10.1016/S0196-8904(3)00131-6.
- [35] K. Darkwa and K. J., "Simulation of an integrated PCM-wallboard system," International Journal of Energy Research 2005;29(4):335-43.
- [36] K. Darkwa and J. Kim, "Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall," Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and energy 2004;27(3):215-23.
- [37] V. Tyagi and D. Buddhi, "PCM Thermal storage in buildings: A state of art," School of Energy and Environmental Studies, Indore, Indiana 2005;11(2007):1146-1166.
- [38] "Trombe Wall," [Online]. Available: [www.designingbuildings.co.uk/wiki/Trombe\\_wall](http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Trombe_wall).
- [39] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," Devi Ahilya University, Indore, India 2007;13(2009):318-345.
- [40] H. Weinlader, A. Beck and J. Fricke, "PCM-facade-panel for day lighting and room heating," Appl. Thermal Engineering 2001; 21:1909-1923.
- [41] L. Royon, L. Karim and A. Bontemps, "Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of building," Univeresite de Paris Denis Diderot 2014; 82(2014):385-390.

- [42] P. Devaux and M. Fatid, "Benefits of PCM underfoot heating with PCM wallboards for space heating in winter," University of Auckland, New Zealand; 191(2017):593-602.
- [43] A. Sharma and C. L. N. Chen, "Solar-energy drying systems: a review," *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(6-7):1185-210.
- [44] H. Weinlader, F. Klinker and M. Yasin, "PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center - regeneration behaviour of two different system designs," *Energy and Buildings*; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.010>.
- [45] J. Guthertz and M. Schiler, "A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings," *Energy Sources* 1991; 13:39-54.
- [46] M. Kenisarin and K. Mahkamov, "Solar energy storage using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007; 11:1913-1965.
- [47] "The practical application of PCM in construction , homes and data centers," [Online]. Available: [http://www.pcmtechnology.eu/applications/\\_385\\_\\_\\_\\_GB](http://www.pcmtechnology.eu/applications/_385____GB).
- [48] A. Griesmer, "Comsol Multiphysics," 6 March 2013. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/what-is-comsol-multiphysics/>.
- [49] "Comsol Multiphysics," [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
- [50] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis and M. Founti, "Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum wall boards," Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.007>, Athens, 2012.
- [51] Knauf. [Online]. Available: <https://www.knauf.de>.
- [52] "Εργαστηριακά δεδομένα που αποκτήθηκαν κατόπιν προσωπικής επικοινωνίας με τον κ. Δ. Κατσουρίνη, Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Θερμότητας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ".
- [53] KENAK, "Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων 2017".
- [54] N. P. Sharifi, A. Shaikh and A. R. Sakulich, "Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals," Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>, 2017.
- [55] K. Biswas and R. Abhari, "Low-cost phase change material as an energy storage medium in building envelopes: Experimental and numerical analyses," Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.003>, 2014.



